Ein Höhenmesser ohne elastische Nachwirkung.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Hohen Philosophischen Fakultät der Universität Leipzig

vorgelegt von

Friedrich Berens v. Rautenfeld

aus Riga.

ACAD.
LUGD.BAT.
BIBL.

Halle (Saale).
Buchdruckerei Heinrich John.
1916.

Angenommen von der III. Sektion auf Grund der Gutachten der Herren

Wiener und **Des Coudres.**

Leipzig, den 25. Januar 1916.

Der Prokanzellar
G. Herglotz.

Meinen lieben Eltern!

Nachstehende Arbeit wurde im physikalischen Institut der Universität Leipzig ausgeführt.

Zu großem Danke verpflichtet bin ich

Herrn Professor Wiener

für die Anregung zu nachstehender Arbeit, ferner Herrn ***Dr. Schiller*** und später Herrn ***Professor Scholl*** für manche wertvollen Ratschläge, sowie endlich Herrn ***Donner*** für die Ausführung der Versuchsanordnungen.

Inhaltsübersicht.

Seite

I. Einleitung.
1. Zweck der Arbeit 7
2. Frühere Lösungsversuche des Problems 7
3. Prüfung bisheriger Apparate 10

II. Material.
1. Literatur über Quarz 14
2. Versuche mit Glasplatten 17
3. Versuche mit Quarzplatten 19

III. Form des Apparates.
1. Bisherige Barometerform 22
2. Quarzdosen 24
3. Erste Hebelübertragung 27
4. Zweite Hebelübertragung 29
5. Mikroskopische Ablesung 31
6. Photographische Aufzeichnung 36

IV. Einzelheiten zur Justierung des Apparates.
1. Temperaturveränderung 43
2. Zeitmarken 46
3. Stellung der Skale gegen die Verschiebungsrichtung 47

V. Schluß.
1. Anwendungsmöglichkeiten des Apparates 48
2. Beschreibung des Apparates 50

Ein Auszug aus dieser Dissertation erscheint im April in der „Zeitschrift für Instrumentenkunde“.

I. Einleitung.

1. Zweck der Arbeit.

Der barometrischen Höhenmessung stehen bisher nur recht unvollkommene Apparate zur Verfügung, wenn es gilt, Druckänderungen in kurzer Zeit festzustellen oder Druckwerte zuverlässig zu messen, falls sie nicht längere Zeit konstant bleiben. Solche Messungen sind aber für manche Zwecke notwendig oder doch sehr wertvoll, vor allem in der Luftschiffahrt. Hier hat man es ja meist mit schnellem Wechsel der Höhen zu tun, wobei jede Höhe möglichst genau gemessen werden muß. Alle bisherigen Apparate nun versagen hier, weil sie alle der elastischen Nachwirkung in nicht geringem Grade unterliegen. Sie sind also nicht imstande, Druckwerte, die sich nicht einige Zeit konstant halten, praktisch richtig anzuzeigen; und dieser Mangel macht sich in steigendem Grade bemerkbar, wenn die Drucke sich schnell oder stark ändern.

Eine wesentliche Besserung ist hier nur erreichbar durch Verwendung eines Materials, dessen elastische Nachwirkung geringer ist, als die des bisher verwendeten. Da erscheint nun als ganz ideales Material der Quarz oder eventuell gewisse Glassorten. Besonders beim Quarz ist irgend eine elastische Nachwirkung praktisch überhaupt nicht feststellbar.

2. Frühere Lösungsversuche des Problems.

Von solchen Gedanken ausgehend, schlug Herr Professor Wiener mir vor, die Herstellung eines Höhenmessers mit möglichst verringerter elastischer Nachwirkung zu versuchen. Bisher ist dieser Weg, soviel ich feststellen konnte, noch nicht beschritten worden, außer beim Bau von Manometern für den physikalischen

Chemiker (s. u.). Allerdings fehlt es auch nicht ganz an Versuchen, die elastische Nachwirkung zu umgehen. So haben Watkin und Hicks[1]) ein „Berganeroid“ hergestellt. Das Instrument wird stets nur für die Minute der Ablesung dem betreffenden Luftdruck ausgesetzt und damit die sog. Standänderung verringert, aber nicht die elastische Nachwirkung. Versuche ergaben, daß die Standkorrektion bei Druckdifferenzen von 790 mm bis 430 mm Hg unter 1,7 mm blieb.

Ferner benutzt Fischer[2]) ein Luftdruckaräometer, das in Wasser schwimmt, dessen Temperatur durch einen umgebenden Eismantel auf 0° gehalten wird. Ein solches Instrument ist natürlich frei von Nachwirkung. Eine Ungenauigkeit wird hier nur eintreten durch Verdunsten des Wassers, wobei der Nullpunkt sich verschiebt, und durch Benetztwerden des Stieles (beim Volumaräometer) bezw. des Aufhängedrahtes (beim Gewichtsaräometer). Die Ablesung läßt sich fast momentan, in höchstens 10 Sekunden ausführen. Die Genauigkeit ist ausreichend, da 1 mm an der Skale etwa 1 mm Quecksilberdruck entspricht. Fischer schließt: „Ich glaube, mit beiden Barometern, dem Luftdruckvolum- und Luftdruckgewichtsaräometer, Instrumente gefunden zu haben, welche genauere Höhenbestimmungen zu ermitteln gestatten, als die bisher benutzten Luftdruckmeßapparate, soweit als deren Angaben für die Höhenbestimmungen maßgebend sind.“

Endlich hat Ladenburg[3]) ein Manometer beschrieben, das aus einem nach Art der Bourdonschen Röhre gekrümmten, möglichst flachen Glasrohr besteht, dessen Bewegung durch ein Mikroskop oder mit Spiegel und Skale abgelesen werden kann.

Über die mikroskopische Ablesung macht Ladenburg folgende Angaben: Der Ausschlag beträgt 2 bis 4 mm für 760 mm Hg; das Mikroskop mit Okularmikrometer gestattete $^1/_{400}$ mm direkt abzulesen, so daß einem Teilstrich etwa $^1/_2$ bis 1 mm Hg entsprach.

Für Spiegelablesung ist die Empfindlichkeit bedeutend größer: für 1 at kommt eine Drehung des Spiegels um 60° zustande, und man kann bei einem Abstand des Maßstabes von 1 m noch $^1/_{20}$ mm Druck messen.

---

[1]) Zeitschr. f. Instr.-Kunde **19** (1899), S. 318 (Referat über: E. Whymper, The Times vom 17. Dez. 1898).

[2]) Meteor. Zeitschr. **17** (1900), S. 257.

[3]) Verh. d. Deutschen Phys. Ges. **8** (1906), S. 20.

Diese Form ist später in Quarzglas hergestellt worden und wird in folgender veränderter Gestalt viel in der physikalischen Chemie verwendet:

Johnson[1]) bildete den Apparat zu einer mehrfach gewundenen Spirale aus, die er an einem Ende mit einem Spiegel versah und in ein mit einem Quecksilbermanometer verbundenes Mantelgefäß setzte. Damit konnte er bei Einstellung des äußeren Druckes auf die Größe des inneren — Benutzung des Apparates als Nullinstrument — eine Eichung für jede einzelne Spirale vermeiden.

Er sagt darüber ferner folgendes: „Die Nullstellung der Glasspirale ist von der Temperatur wegen der Ausdehnung nicht unabhängig . . . . . Quarzspiralen, die ich auch herstellen konnte, sind von dieser Nullpunktsvariation jedenfalls frei . . . . . Die Druckempfindlichkeit wächst mit der Anzahl der Windungen, mit ihrer abnehmenden Wandstärke und mit der Abweichung ihres Querschnittes von der Kreisform. Die von mir verwendeten Spiralen lassen eine Druckvariation von der Größenordnung 1 mm Hg sicher messen. Die Nullpunktsvariation erfolgte linear mit der Temperatur."

Denselben Apparat benutzte auch Preuner[2]) für seine Messungen, und er teilt noch mit, daß eine direkte Messung — d. h. ohne Benutzung als Nullinstrument — bis zu 1 at ausführbar ist. Mit einer 2 m entfernten Skale konnte er Druckänderungen von 1 mm Hg noch bequem ablesen. Der Apparat wird meist zur Druckmessung von Gasen verwendet, die mit Quecksilber nicht in Berührung kommen dürfen. Die Quarzspiralen sind aber sehr zerbrechlich und vertragen auch geringe Erschütterungen und sogar plötzliche starke Druckänderungen nicht.

Nach dem gleichen Prinzip hat Bodenstein[3]) eine einmal gewundene Quarzglasspirale benutzt mit einem Zeiger daran, dessen Angaben mit Mikroskop und Okularmikrometer abgelesen werden. Die Ausschläge waren praktisch proportional dem Drucke, und dies sowohl bei Über- als bei Unterdruck. Sobald der Apparat festliegt, so daß die Schwere ihren Einfluß auf den — wagerecht

---

[1]) Zeitschr. f. phys. Chemie **61** (1908), S. 457.

[2]) Zeitschr. f. Chem. **68**, S. 129 und **81**, S. 129; der Apparat ist auch beschrieben in Ostwald-Luther, Physiko-Chem. Messungen, 3. Aufl., S. 157.

[3]) Zeitschr. f. Elektrochemie **15** (1909), S. 244.

wie die Spirale liegenden — Zeiger nicht ändert, sind die Angaben bis auf 2 mm Hg zuverlässig.

Gibson[1]) verwendet statt dieses Rohres eine Quarzglasmembran; aber dieses Manometer ist schwer zusammenzusetzen und schwierig zu behandeln, daher in der Praxis nicht im Gebrauch.

3. Prüfung bisheriger Apparate.

Auf die Mängel der bisherigen Barometer muß noch ein wenig eingegangen werden, um zu zeigen, in welchem Grade sie eine gute Verwertung der Angaben beeinträchtigen. Bei Ballonaufstiegen, für die ja die Lösung dieses Problems vor allem in Frage kommt, lassen sich Quecksilberbarometer naturgemäß schlecht verwenden; so bleiben nur die Aneroide in ihren verschiedenen Ausführungen zur Ablesung oder als Barographen. Mit Aneroiden sind sorgfältige Prüfungen vorgenommen worden durch Chree, Rosenthal, Hebe und vor allem Reinhertz. Auf Chrees Arbeit hat Marvin einige Versuche folgen lassen.

Chree[2]) prüfte die Nachwirkungen von Aneroiden bei Drucken zwischen 760 und 380 mm Hg und fand eine Formel, welche 3 Konstanten enthielt: eine für jedes Instrument verschiedene, eine von der Länge des Aufenthaltes bei tiefstem Druck abhängige und eine von der Beziehung zwischen der Dauer der Druckverminderung und der Dauer der Erholung abhängige Konstante. Die Formel ist recht verwickelt.

Marvin[3]) fand, daß das Nachhinken weniger der starken Blattfeder, als der gewellten Dose des Aneroids zuzuschreiben ist, und versuchte Dosen aus Stahl, ohne jedoch gute Resultate zu erzielen.

Rosenthal[4]) berechnet, bei Versuchen ähnlich denen von Chree, die halben Summen und Differenzen der Abweichungen von der zugrunde gelegten Skale als einfache Funktionen von Druckintervall und Geschwindigkeit der Druckänderung. Der Fehler wird so meist geringer als 1 mm bei zehn Richardschen Barographen mit Vidischen Kapseln. Besonders günstig liegt

[1]) Dissertation Breslau 1911; erwähnt nach K. Arndt, Handbuch der phys.-chem. Technik, S. 223.

[2]) Philos. Transact. **191** (1898), S. 441.

[3]) Monthly Weather Review U. S. A. **26** (1898), S. 410.

[4]) Bull. Acad. Imp. Sc. de St. Pétersbourg **19** (1903), S. 115.

die Sache bei Richardschen Barographen mit Bourdonschen Röhren, die eine besondere Metallkompensation enthalten.

Hebe[1]) findet in seiner Arbeit kurz folgende Ergebnisse:

1. Der Temperaturkoeffizient sinkt mit der Temperaturabnahme etwas — außer bei der Verwendung von Konstanten, wo er minimal ansteigt — und steigt langsam bei Druckabnahme. Den Haupteinfluß hat hier nicht die Dose, sondern die ihre Spannung ausgleichende Feder. Für große Temperaturunterschiede sollte die Dose völlig luftleer sein, während man sonst den Temperatureinfluß durch Zurücklassen einer kleinen Luftmenge in der Dose einigermaßen ausgleichen kann.

2. Es wird mit den Jahren eine Standkorrektion nötig, die für verschiedene Drucke bei den Instrumenten zum Teil recht beträchtlich wird, bei manchen für einen Gang bis 400 mm Hg über 20 mm erreicht.

3. Die elastische Nachwirkung ist sehr verschieden. Die auf ihr beruhende oft Jahre andauernde Änderung der Standkorrektion wird rascher ausgeglichen durch mehrfaches Erwärmen der Dosen bei niederem Druck. Die Nachwirkung äußert sich bei schnellen Druckänderungen in verschieden starkem Zurückbleiben gegen den wahren Wert. Der Fehler wächst mit der Geschwindigkeit der Druckänderung und mit der Vertiefung des wirkenden Druckes. Die Differenz der Fehler für eine Geschwindigkeit von 5 mm/Min. und eine solche von 0,25 mm/Min. betrug bis zu 3,1 mm bei 476 mm Hg, was einer Höhe von 50 m bei diesem Druck entspricht. Deutliche Änderungen sind nicht nur nach Stunden, sondern noch nach Tagen wahrnehmbar! Hebe schließt mit den Worten:

„Die Korrektur der elastischen Nachwirkung andererseits bleibt unter allen Umständen unvollkommen. Ein Vorteil läßt sich wohl dadurch erzielen, daß man die Prüfung nicht darauf beschränkt, das Instrument nur vorübergehend niederem Druck auszusetzen, sondern daß man eine dem mittleren Gebrauch nahe kommende Geschwindigkeit der Druckänderung mit angemessenen Pausen innehält. Unvollkommen aber bleibt auch dieses Verfahren, und so besteht noch immer als wichtigstes Bedürfnis die Einführung eines Materials für die Aneroiddosen, welches der elastischen Nachwirkung weniger als bisher unterworfen ist."

[1]) Zeitschr. für Instr.-Kunde **20** (1900), S. 253.

Hebe hat, außer der erwähnten Arbeit, gemeinsam mit Wiebe[1]) Prüfungen speziell bei tiefen Temperaturen vorgenommen. Danach haben die „kompensierten“ Apparate einen Fehler von unter 0,1 mm/Grad, die nicht „kompensierten“ bis 0,3 mm/Grad; bei letzteren steigt der Fehler mit sinkender Temperatur, bei ersteren weniger oder ändert sich ganz verschieden. Es wird vorgeschlagen, alle Teile, außer den zur Kompensation dienenden, aus gleichem Material herzustellen.

Die genauen Untersuchungen von Reinhertz[2]) gaben folgende Resultate:

Es wird unterschieden zwischen einer langsamen Nachwirkung, die unabhängig ist von den vorkommenden Druckschwankungen, und einer infolge dieser Schwankungen auftretenden elastischen Nachwirkung. Erstere hängt von der Bauart des Apparates ab in der Weise, daß die Wellen der Blechplatten der Vidischen Büchse sich allmählich abflachen, weil an den Rändern der starre Ring nicht nachgibt und in der Mitte die Zugkraft der starken Spannfeder angreift. Dies bezieht sich auf die meist gebrauchten Instrumente nach den Systemen von Naudet und von Goldschmidt; ähnliches gilt für das Reitzsche System, wo eine Spiralfeder — statt einer Blattfeder — erst durch eine starke Übersetzung wirkt. Anders ist es natürlich bei Apparaten mit einer Bourdonschen Röhre, diese sind aber nicht näher behandelt. Der Fehler ist übrigens nicht groß, etwa 1 bis 2 mm Hg für mehrere Jahre. Die eigentliche elastische Nachwirkung ergab sich bei den Versuchen wie folgt:

Ein Intervall von 30 mm, zu je 10 mm in 50 bzw. 20 bzw. 10 Min. erreicht, ergab eine Stunde nach Einstellung eine Nachwirkung von 0,15 bis 0,33 mm; eine Differenz von 20 mm, erreicht mit einer Geschwindigkeit von 0,2 oder 0,5 oder 1 mm pro Min., ergab einen Abstand von der Ruhelage von 0,29 oder 0,35 oder 0,42 mm. Es werden auch näherungsweise geltende Formeln diskutiert; über die Korrektion wird dann folgendes gesagt:

„Wie schon bemerkt, würde es weder möglich noch zweckmäßig sein, eine allen Anforderungen der Praxis entsprechende Korrektion rechnerisch mit Hilfe der ermittelten Konstanten abzuleiten, sondern es würde vielmehr eine auf empirischem Wege

[1]) Zeitschr. für Instr.-Kunde **21** (1901), S. 331.
[2]) Zeitschr. für Instr.-Kunde **7** (1886), S. 153 und S. 189.

ermittelte Verbesserung den Vorzug verdienen, die, um den Verlauf der die Nachwirkung verursachenden Druckschwankungen bequem verfolgen zu können, an den graphisch aufgetragenen Beobachtungen anzubringen sein würde."

Verfährt man bei Höhenmessungen nach dem Prinzip, möglichst nur einseitige Druckschwankungen sich auszuwählen, so kann die Genauigkeit mit Hilfe der Korrektion bei guten Apparaten in die Nähe der bei dem Prinzip der barometrischen Höhenmessung überhaupt erreichbaren Genauigkeit gebracht werden. Aber das ist in Ballonen nicht gut durchführbar. Bei diesen sind in großen Höhen Fehler der Aneroidangaben von mehreren Hundert Metern nicht selten (vgl. S. 24.)

II. Material.

1. Literatur über das mechanische Verhalten von Quarz.

Zusammenfassend läßt sich also feststellen, daß die bisherigen Apparate die gewünschte Genauigkeit nicht erreichen. Um die elastische Nachwirkung zu vermeiden, kam es jetzt darauf an, ein anderes Material zur Herstellung der Barometer zu finden. Da lagen Messungen an verschiedenen Stoffen vor, und diese ließen den Quarz als besonders geeignet erscheinen. Die ersten Messungen einer Nachwirkung bei Quarz von Threlfall[1]), Barnett[2]) u. a. ergaben ein negatives Resultat.

Grundlegend ist die Arbeit von Joffé über die elastische Nachwirkung im kristallinen Quarz. Die Elastizität und Festigkeit behandelt eingehend Schulze, Elastizitäts-, Rigiditäts- und Temperaturkoeffizient Guthe, Elastizität und Härte Auerbach.

Joffé[3]) sagt über die Größe der elastischen Nachwirkung beim Quarz folgendes (aus den Einleitungssätzen):

„In organischen Körpern und Geweben (Kautschuk, Kokon) ist die Nachwirkung von der Größenordnung der primären Deformation, bei gewöhnlichen Gläsern, Legierungen und reinen Metallen erreicht sie noch einige Prozente; noch viel kleiner ist sie in einfacher zusammengesetzten Glassorten und besonders in Fäden aus amorphem Quarz . . . . Als Versuchsobjekt für die vorliegende Untersuchung wurde Quarz gewählt. Er ist fast vollkommen spröde, seine Elastizitäts- und Festigkeitsgrenze fallen zusammen, deshalb ist jede Deformation elastisch. Seine große Festigkeit und Härte erhöhen die erreichbare Genauigkeit. Außerdem ist er in nötiger Reinheit und Härte zu erhalten und bekommt nicht leicht Sprünge."

[1]) Phil. Mag. V, **30** (1890), S. 99.
[2]) Phys. Review **6** (1898).
[3]) Ann. der Physik IV, **20** (1906), S. 919.

Die Messungen wurden nach der Interferenzmethode oder durch Messung der Piëzoelektrizität gemacht, so daß die Genauigkeit sehr groß war, bis 0,00003 der Deformation, der Fehler nur bis 0,1 Streifen bei der Interferenzmethode. Das gab folgende Resultate:

Bei einer Biegung bis $^1/_5$ der Festigkeitsgrenze gaben piëzoelektrische Platten von (8 bis 9) : 2 : (0,6 bis 0,7) cm eine Nachwirkung von ca. 0,0004 der Deformation. Es werden Diagramme gegeben, aus denen folgt, daß sich die Durchbiegung zu 2 bis 4 Interferenzstreifen der D-Linie ergibt; ferner haben Jenaer Gläser nur geringe Nachwirkung, besonders Glas O 102 nur $^1/_{16}$ der Nachwirkung des gewöhnlichen Glases, d. h. bis $1^1/_2$ Min. ca. $^1/_{2000}$ der gesamten Durchbiegung, von 2 Min. an eine sehr geringe. Es heißt gegen Schluß der Untersuchung:

„Die Untersuchung der Biegungsnachwirkung des Quarzes hat somit zu einem negativen Resultat geführt, eine elastische Nachwirkung konnte auch nicht nachgewiesen werden," also nur eine von verschwindender Piëzoelektrizität herrührende Nachwirkung war meßbar. Und am Schluß:

„Die elastische Biegungsnachwirkung im kristallinen Quarz ist mit den angewandten Mitteln nicht nachweisbar. In Quarzplatten, die ohne elektrische Erregung deformiert werden, ist die Nachwirkung im Zeitintervall 1 Sek. bis 1 Std. nach vorhergehender 80 Std. andauernder Deformation kleiner als 0,00007 des Biegungspfeiles, während sie im gewöhnlichen Glas mehr als $2\,^0/_0$ der Deformation beträgt."

K. E. Guthe[1]), der nach quarzähnlichen Substanzen sucht, gibt folgende von ihm gefundene Daten für geschmolzenen Quarz:

„Elastische Ermüdung", d. h. allmähliche Abnahme der elastischen Fähigkeiten, $^1/_2$ bis $^1/_3$ derjenigen von Stahl oder Phosphorbronze, Temperaturkoeffizient der Torsionskonstanten 0,000149.

F. Auerbach[2]) untersuchte kristallisierten und amorphen Quarz und Opal, d. i. wasserhaltige Kieselsäure. Der „Eindringungsmodul" (durch Druckversuche bestimmter Elastizitätsmodul)[3]) E' ist im Mittel für Quarz ∥ Achse 10620, ⊥ Achse 8566, für amorphen Quarz 6970 und für Opal 3893 kg/qmm, die Härte

[1]) Phys. Review **18** (1904), S. 256.
[2]) Annalen d. Phys. IV, **3** (1900), S. 116.
[3]) Annalen d. Phys. III, **45** (1892), S. 274.

entsprechend 308, 230, 223 und 113 kg/qmm. Der Elastizitätsmodul E wäre zu finden als $E = \frac{E'}{1-\mu^2}$ wo μ die Elastizitätszahl, d. i. das Verhältnis der Querkontraktion zur Längsdehnung, sein soll, welche man, ihrer Stellung im Ausdruck nach, nur sehr annähernd zu kennen braucht. Für Quarz sind die Werte für E und E' annähernd gleich. Übrigens sind Elastizität und Härte des amorphen Quarzes kleiner als beim kristallisierten in irgend einer Richtung, und beim Opal wenig mehr als halb so groß wie beim amorphen Quarz. Als Erklärung dieser merkwürdigen Tatsache wird angegeben, daß sich Quarz beim Schmelzen und amorphen Erstarren ausdehnt, so daß er ein spezifisches Gewicht von 2,23 statt 2,68 erhält; und für Opal kommt sein größerer Wassergehalt zur Wirkung.

F. A. Schulze[1]) hat — da zur Erklärung der großen Widerstandsfähigkeit des amorphen Quarzes, wie Richarz zeigte, der geringe thermische Ausdehnungskoeffizient nicht genügt, sondern das Verhältnis zwischen Deformation und Spannung ähnlich dem anderer vergleichbarer Substanzen sein und erhebliche Bruchfestigkeit bestehen muß — diese letzten Größen gemessen. Er fand durch Messung der Biegung- und Torsionstöne E = 6238 kg/mm², T (Torsionsmodul) = 2470 kg/mm² und μ = 0,2605, ferner die Biegungsfestigkeit: die maximal ausgehaltene Spannung zu 6,89 kg/mm², welche Zahl wegen der im Quarz vorhandenen Luftbläschen möglicherweise zu klein ist. Die Maximalspannung von Glas ist nach v. Kowalski 8,52 bis 8,99 kg/mm². W. Voigt fand für die Maximalspannung für Bergkristall je nach der Orientierung 10,7 bis 18,1 kg/mm².

Endlich gibt F. Stumpf[2]) eine größere Anzahl von früheren und eigenen Resultaten für Quarzglas; von ersteren sind außer den bereits mitgeteilten noch folgende interessant:

R. Threlfall[3]) fand E = 4210 bis 7700 und T (Torsionsmodul) = 2120 bis 3500 kg/mm².

C. V. Boys[4]) erhielt E = 6120, T = 2426 kg/mm², μ = 0,26.

---

[1]) Ann. d. Phys. IV, **14** (1904), S. 384.
[2]) Ann. d. Phys. IV, **40** (1913), S. 879.
[3]) Phil. Mag. V, **30** (1890), S. 99.
[4]) Phil. Mag. V, **30** (1890), S. 116.

F. Horton[1]) T = 3060.

Auerbachs (s. o.) Messungen geben mit Boys' Resultaten durch Rechnung E = 7490, mit Stumpfs Resultaten E = 7112 kg/mm².

Schidlof und Alfthan-Klotz[2]) fanden aus der kubischen Ausdehnung eines Kolbens E = 6240, T = 2390 kg/mm², μ = 0,306.

Stumpf selbst findet E = 7123, T = 3145 kg/mm² und μ = 0,133.

Schließlich enthalten die Landolt-Börnsteinschen Physikalisch-Chemischen Tabellen (1912) noch für Kristallquarz nach Voigt[3]) die Zugfestigkeit: ∥ zur Achse 16,3, ⊥ dazu 12,6 kg/mm², die Druckfestigkeit: ∥ zur Achse 182, ⊥ dazu 160 kg/mm² und E = 10304, $E_\perp$ = 7853; für Quarzglas E = 6900; für gewöhnliches Glas die Druckfestigkeit 70 bis 100 kg/mm² und E = 6775 kg/mm².

2. Versuche mit Glasplatten.

Nun ist in dieser Arbeit zunächst außer dem Quarz auch Glas ins Auge gefaßt worden. Insbesondere hatten ja gewisse Jenaer Gläser eine sehr kleine elastische Nachwirknng. Joffé erwähnt in seiner Untersuchung (s. o.) das Glas O 102 als fast nachwirkungslos.

Zuerst wurden einige orientierende Versuche mit gewöhnlichem Glas gemacht. Es wurden kreisrunde Platten auf eine oben offene Messingdose gelegt und abgedichtet, darauf die so geschlossene Dose an eine Wasserstrahlpumpe angeschlossen und nach Bedarf ausgepumpt, wobei der Druck an einem seitlich angeschlossenen Quecksilberbarometer abgelesen werden konnte. Die Durchbiegung der Platten ließ sich durch einen Metallhebel ablesen, der, an einer horizontalen Achse leicht drehbar, mit dem einen in eine kleine Kugel auslaufenden Ende auf der Mitte der Glasscheibe durch ein geringes Übergewicht auflag und am anderen Ende einen Spiegel trug, der bei der Bewegung das Bild einer festen Skale im Fernrohr verschob. So ließ sich eine ausreichende

[1]) Proc. Roy. Soc. **74** (1905), S. 401.
[2]) Arch. de Genève IV, **27** (1909), S. 487.
[3]) Wied. Ann. **31** (1887), S. 474 und 701.

Genauigkeit erzielen. Schwierigkeiten machte die Befestigung der Platten auf der Dose. Zunächst wurden sie mit dem Rand in eine auf den Dosenrand aufgebrachte dünne Schicht Wachskitt unter Erwärmen aufgedrückt. Dann wurde zu anderen Befestigungsarten geschritten; und zwar wurde zuerst weißer Siegellack auf den Dosenrand gebracht, bis zum Fließen erwärmt und mit der fest aufgedrückten Glasplatte abgeschlossen. Später wurde die Platte statt dessen mit einem Messingring aufgeklemmt, der sich auf den Dosenring fest aufschrauben ließ; dann wurde die verbleibende Rinne mit Wachskitt ausgegossen. Die Resultate waren aber in allen Fällen ungenügend, da zur eigentlichen Nachwirkung des Glases eine solche des Verbindungsmaterials hinzutrat. Zwar war die Durchbiegung der Platten schon bei der einfachen Wachsbefestigung, die doch jedenfalls am wenigsten zuverlässig ist, annähernd dieselbe, die man aus dem Elastizitätskoeffizienten berechnen konnte. Aber die scheinbare Nachwirkung war viel zu groß.

Was zunächst die Durchbiegung betrifft, so ist sie nach Föppl[1]) für Platten mit festgeklemmtem Rand

$$f = \frac{3}{16} \cdot \frac{m^2 - 1}{m^2 \cdot E \cdot h^3} \cdot p \cdot r^4$$

und für solche mit lose aufliegendem Rand

$$f = \frac{3}{16} \cdot \frac{m^2 - 1}{m^2 \cdot E \cdot h^3} \cdot p \cdot \frac{5\,m + 1}{m + 1} \cdot r^4$$

wo $\frac{1}{m} = \frac{\text{Querkontraktion}}{\text{Längsdilatation}}$ = Poissonsche Elastizitätskonstante, E = Elastizitätsmodul und h = halbe Dicke der Platte.

Nun wurde, wenn man für Glas als Elastizitätsmodul 6900 und als Poissonsche Konstante 0,24 annahm, bei 40 cm Quecksilberdruckdifferenz gefunden:

Für eine Platte von		die absolute Durchbiegung in mm		
			berechnet für	
Durchmesser mm	Dicke mm	beobachtet	feste Platte	lose Platte
84	1,5	0,97	1,022	4,341
84	1,76	0,53	0,399	2,135
54	1,2	0,37	0,341	1,447
54	1,78	0,08 (?)	0,145	0,448

[1]) Vorlesungen über technische Mechanik, Band III (Festigkeitslehre). 5. Auflage 1914, S. 262 und 270.

Aber trotz dieser — nach dem Durchbiegungsergebnis scheinbar guten — Befestigung zeigte sich in allen Fällen eine auffallend starke Nachwirkung, die entschieden hauptsächlich dem Befestigungsmittel zuzuschreiben war. Dies ergab sich auch daraus, daß bei Anwendung des Jenaer Glases O 102, welches ja eine 16 mal so kleine elastische Nachwirkung besitzt wie gewöhnliches Glas, die beobachtete Nachwirkung kaum verringert erschien. Der Beitrag des Verbindungsmaterials ließ sich nicht gut ermitteln, besonders weil die Resultate überhaupt nicht sehr genau wurden, sondern nach jedem neuen Schmelzen des Befestigungsmittels oder jedem neuen Aufschrauben des Metallringes wieder voneinander abwichen. Der Ring hätte an sich vielleicht die zuverlässigste Befestigungsart gegeben; aber sobald die Schrauben sehr fest angezogen wurden, sprang alsbald die Glasplatte infolge innerer Spannungen. Über die einzigen zuverlässigen Messungen mit Jenaer Glas, die ebenfalls ungünstige Resultate ergaben, wird weiter unten (S. 26 f.) berichtet werden.

3. Versuche mit Quarzplatten.

Es wurde also zu dem idealen Material übergegangen, dem Quarz. Und zwar gab es hier zwei Möglichkeiten: entweder ließ sich kristallisierter Quarz verwenden, also Bergkristall; oder geschmolzener Quarz, sogenanntes Quarzglas. Letzterem wurde aus mehreren Gründen gleich zuerst der Vorzug gegeben. Zunächst fallen beim geschmolzenen Quarz alle Schwierigkeiten fort, die sich aus der Verschiedenheit aller in Frage kommenden physikalischen Eigenschaften in den drei Kristallrichtungen ergeben. Diese Eigenschaften sind hier bereits nach den zuverlässigsten Messungen angeführt worden (vgl. S. 14 bis 17). Wenn auch der Elastizitätsmodul hier etwas kleiner ist als bei Bergkristall, so ist schon der Ausdehnungskoeffizient wieder bedeutend günstiger.

Ferner besteht — vor allem in Deutschland — schon seit einer Reihe von Jahren eine fabrikmäßige Herstellung von Quarzapparaten, bei der Quarz allgemein geschmolzen und als Glas verarbeitet wird. W. C. Heraeus in Hanau, Busch in Rathenow und Dr. Voelcker (Sidiowerk) in Beuel a. Rh. sind die führenden Fabriken in dieser Quarzglasindustrie.

Die Platten des Sidiowerkes waren geschmolzen, aber nicht poliert, sondern außen rauh und völlig undurchsichtig. Die äußeren

Unebenheiten erschweren die Prüfung, indem sie die Stellung des den Spiegel tragenden Hebels bei der Bewegung beeinflussen. Die kleine Kugel des Hebels, welche auf der Platte aufliegen soll, kann bei der Senkung der Platte leicht in eine Vertiefung hineingeraten, in der sie bei einer früheren Stellung etwa noch nicht gelegen hatte. Bei völlig ebenen Platten, wie die der Firma Busch, läßt sich wenigstens vermuten, daß eine etwaige Bewegung der Kugel auf der Platte stets in gleicher Weise vor sich geht; das ist aber bei einer rauhen Platte nicht ohne weiteres anzunehmen.

So wurde bald zu den Platten der Firma Busch übergegangen. Diese sehen wie Spiegelglasplatten aus, da sie durchsichtig sind oder das Licht doch nur wenig diffus durchlassen. Über die elastischen Eigenschaften des Quarzglases ist oben berichtet worden. Es bestand hier nicht die Absicht, die früher gefundenen Werte zu verbessern. Nur prinzipiell sollte festgestellt werden, ob und in welcher Form das Material sich für unseren Zweck eignen würde. Auch mit den Quarzplatten wurden die verschiedenen Arten der Befestigung und Abdichtung durchprobiert. Hier zeigte sich besonders deutlich, daß auf das Konto des Wachskittes oder des Siegellackes eine gewisse Nachwirkung zu setzen ist.

Um nun aber jedes störende Dichtungsmaterial auszuschalten, wurde von Heraeus ein Quarzglasring bezogen, auf der eine Platte aus Quarzglas aufgeschmolzen war. Der Ring war 7—8 mm hoch, 3—4 mm dick und innen 31 mm im Durchmesser; die ca. 0,51 mm dicke Platte war durch das Anschmelzen etwas uneben und durch Spannungen elastisch und optisch ungleichmäßig, aber in ihrer Gesamtheit doch für die Messungen geeignet. Übrigens sind alle späteren Formen von Heraeus bezogen, da diese Fabrik sich besonders mit Schmelzen derartiger Gefäße aus klarem Quarzglas befaßt.

Der Ring wurde auf eine passende Messingunterlage gesetzt und die Ränder mit Siegellack ausgegossen; um den Quarzring ein Metallband befestigt, das die Achse des mit einem Spiegel versehenen, in der Mitte der Quarzplatte leicht aufliegenden Hebels trug. Abgelesen wurde später (Tabelle II) mittels eines besonders starken Fernrohres (Vergrößerung etwa 20fach) und als feste Marke im Okular ein selbstgefertigtes besonders feines Fadenkreuz verwendet, so daß sich Zwanzigstel eines Skalenmillimeters noch sehr gut schätzen ließen. Die wahre Durchbiegung in Millimetern

in der nachstehenden Tabelle dieser Resultate ergibt sich durch Division der Zahl der Skalenmillimeter durch annähernd 61.

Hier ergaben nun die zahlreichen Versuche zuweilen eine minimale Nachwirkung, die aber wohl nur scheinbar und mehr auf das Konto der Ablesungsfehler zu setzen war. Überall, wo in der Tabelle kein Wert verzeichnet ist, war keine Abweichung vom Anfangswert zu beobachten. Diese Anfangswerte zeigen zugleich, daß die Durchbiegung dem Druck nahezu proportional ist.

	Druckdifferenz mm Hg zunehmend ↑ abnehmend ↓		Skalen-mm	Nachwirkung in Skalen-mm nach ¼ Min.	½ Min.	1 Min.	2 Min.	3 Min.	4 Min.
I.	308	↑	12,5	—	—	—	—	—	—
		↓	12,4	0,05	—	—	—	*0,05	—
	400	↑	16,4	—	—	—	—	—	—
		↓	16,4	—	—	—	—	—	—
	500	↑	20,45	—	—	—	—	—	—
		↓	20,4	0,05	—	—	—	—	—
	589	↑	24,35	—	0,05	—	—	—	—
		↓	24,4	—	—	—	—	—	—
II.	600	↑	24,2	—	0,05	—	—	—	—
		↓	24,25	—	—	—	—	—	—
	500	↑	20,3	—	—	—	—	—	—
		↓	20,4	—	—	—	—	—	—
	401	↑	*16,35	—	—	—	—	—	—
		↓	16,7	—	—	0,05	—	—	—
	299	↑	12,3	—	—	—	—	—	—
		↓	12,3	—	—	—	—	—	—
	200	↑	8,25	—	—	—	—	—	—
		↓	8,25	—	—	—	—	—	—
	101	↑	4,2	—	—	—	—	—	—
		↓	4,2	—	—	—	—	—	—

* heißt: zufällige Verschiebung.

III. Form des Apparates.

1. Bisherige Barometerform.

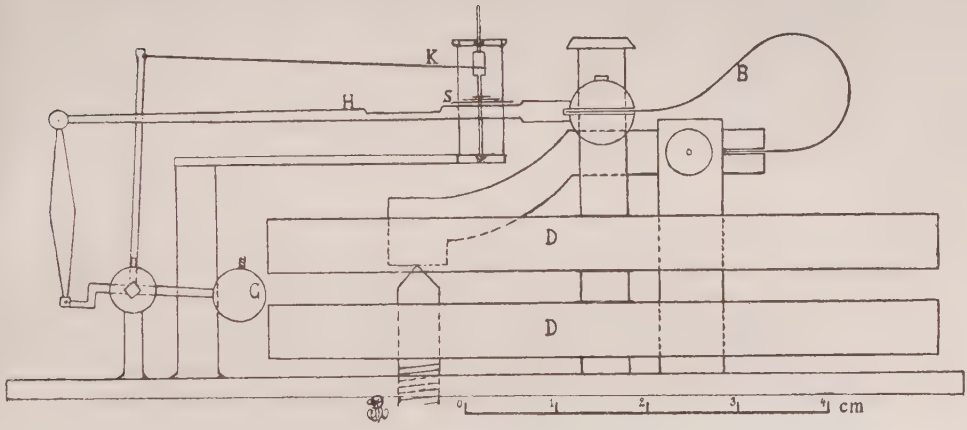
Nach diesen vorläufigen Versuchen wurde zur Auffindung der für den praktischen Gebrauch geeignetsten Form geschritten. Von vornherein stand fest, daß nur eine Kombination von mehreren Platten in Betracht kommen konnte, weil die Bewegung einer einzigen lange nicht ausreichend groß war und sich eben wegen ihrer Kleinheit auch nicht in geeigneter Weise genügend zuverlässig vergrößern ließ. Da bot sich von selbst die Dosenform, wie bei den meisten gebräuchlichen Aneroidbarometern, und zwar hier eine Vereinigung mehrerer Dosen. Die Form von Spiralröhren und dgl., welche oben S. 8 ff. erwähnt wurde, bringt mancherlei Schwierigkeiten mit sich und soll daher ein Problem für sich bilden, das vielleicht später durchgearbeitet werden kann.

Vorerst wurden einige Versuche an Aneroiden vorgenommen, um einen Anhalt für die zu wählenden Ausmaße und Nebeneinrichtungen zu gewinnen. Die Prüfungen an einer kleinen Vidischen Dose eines gewöhnlichen Barographen mögen hier kurz mitgeteilt sein. Die Dose hatte einen Durchmesser von $4\,^1/_2$ cm und gewellte Verschlußplatten, deren Dicke nicht hätte gemessen werden können, ohne die Dose zu zerstören.

Die beobachtete Nachwirkung konnte über mehr als 6 Min. verfolgt werden und betrug nach der ersten halben Minute $^1/_{200}$ (0,5 %), nach der ersten vollen Minute etwa schon $^1/_{110}$ (0,7 %) der Gesamtbewegung für 600 cm Hg Druckunterschied. Die wirkliche Bewegung für dieses Intervall betrug etwa 1,1 mm, bei der beschriebenen Quarzplatte (Durchmesser 31 mm, Dicke 0,51 mm) aber etwa 0,39 mm. Bei Quarz ist die Nachwirkung kleiner als 0,00007 (0,007 %) der Durchbiegung (nach Joffé; vgl. S. 15).

Die weiteren Untersuchungen führten dazu, ein größeres Ballonaneroid (13 cm Durchmesser, Dosendurchmesser 74 mm)

auseinanderzunehmen. Es enthält (s. Figur 1; das Folgende ist z. T. nach Luegers „Lexikon der Technik", Artikel „Federbarometer", wiedergegeben) eine — oder hier 2 — vidische Kapseln D aus zwei federhart gewalzten Wellblechen, in der — zur Temperaturkorrektion — eine minimale Luftmenge belassen ist. Auf der Mitte der Dose ist das eine Ende einer starken umgebogenen Blattfeder B befestigt, deren anderer Schenkel mit Hilfe einer um die Dose greifenden Gabel am Außengehäuse festliegt; sie dient dazu, die Luftdruckdifferenz auszubalanzieren, da sonst die Dosenplatten in eine Grenzstellung geraten würden, wo ihre elastischen Eigenschaften einseitig verschoben wären. Andererseits trägt das auf der Dose festliegende Ende der Feder einen Hebel H, der



Figur 1.

mittels mehrerer Winkelhebel an einem Kettchen K zieht, welches auf die Zeigerachse aufgewickelt ist und diese dreht, gleichzeitig durch eine feine Spiralfeder S stets in Spannung gehalten. Die Hebel sind zuweilen zwecks besserer Temperaturkorrektion aus Doppelmetall, und es ist auch Invar, ein besonderer Nickelstahl, dafür vorgeschlagen worden. Statt in der Dose nur etwas Luft zu lassen, kann man übrigens auch — nach der deutschen Patentschrift Nr. 132 840 — neben einer sehr geringen Luftmenge einen festen Körper in die Dose einbringen. Ferner sind am Aneroid gewisse Ausgleichs- oder Gegengewichte angebracht, und hier zeigte sich eine merkwürdige Tatsache: Die Apparate haben am Winkelhebel ein Gewicht G, das den Druck der Feder verstärken sollte; aber vermöge seiner Anordnung leistet es das

nur, wenn das Barometer liegt! Trotzdem werden gerade diese Apparate stets aufgehängt und sind auch in allem Übrigen für diese Lage — besonders an Ballonen — berechnet. Daraus ergibt sich, daß alle so benutzten Apparate ständig falsche Angaben liefern, ohne daß der Benutzer davon eine Ahnung hat! Davon kann man sich sofort überzeugen, indem man ein Aneroid einmal in senkrechter und das andere Mal in wagerechter Stellung abliest.

Die Durchbiegung der Aneroiddosen beträgt etwa 0,005 mm auf 1 mm Hg Druckdifferenz, und die durch Hebel erreichte Vergrößerung der Bewegung ist eine etwa 500 fache. Die elastischen Eigenschaften sind oben behandelt worden (s. S. 10 ff.). Hier sei nur noch erwähnt, daß die Nachwirkung auf eine Höhendifferenz von mehreren 100 m $^1/_4$ bis $^1/_2$ mm Hg wird, für einige 1000 m aber mehrere Millimeter; dabei entspricht bekanntlich 1 mm einer Höhendifferenz von rund 11 m in der Nähe des Erdbodens oder von 20 m in etwa 5000 m Höhe, so daß in Höhen von über 5000 m Fehler von mehreren Hundert Metern entstehen können.

2. Quarzdosen.

Auf eine so komplizierte Hebeleinrichtung mußte von Anfang an verzichtet werden, weil man kein Material mit merklicher elastischer Nachwirkung benutzen durfte und diese feinen Teile nicht alle aus Quarz herstellbar sind. Eine Blattfeder hat in ganz geeigneter Ausführung die Firma Heraeus hergestellt; eine solche konnte eventuell für die Ausbalanzierung des einseitigen Druckes benutzt werden, blieb aber ganz außer Verwendung. Alle vorläufigen Versuche wurden so gemacht, daß man den Innendruck in den Dosen veränderte und außen den für die Zeitintervalle annähernd konstanten Luftdruck beließ; und später zeigte es sich, daß die elastischen Eigenschaften auch bei ausgepumpten Dosen ohne Gegenfeder ausreichten.

Die Dosen selbst hat die Firma Heraeus in folgender Ausführung geliefert:

1. vier hintereinander geschaltete Dosen von 4 cm Durchmesser, 1 cm äußerer Dicke und 0,7 bis 0,8 mm mittlerer Plattendicke, verbunden durch 8 mm lange und 7 bis 8 mm dicke Quarzglasrohre von ca. 4 mm lichter Weite. Jedes Ende besaß

wieder ein Ansatzrohr, von denen eins luftdicht geschlossen und an das andere die Luftpumpe angelegt wurde.

2. Drei in derselben Art miteinander verbundene Dosen von 6 cm Durchmesser, ca. 12 mm Dicke und 0,9 mm mittlerer Plattendicke.

3. Später wurde eine Kombination von vier Dosen bezogen, die nicht aus einem flachen Ring mit angeblasenen Platten bestanden, sondern gleichmäßig abgerundete Ränder hatten. (Siehe Figur 7.) Die Plattendicke war hier reichlich 1 mm, der äußere Durchmesser der Dosen 6 cm und die äußere Dicke 7 bis 8 mm. Diese Dosen wurden erst bei Messung der Temperatureinflüsse benutzt (s. u. S. 43 ff.).

Mit den ersten beiden Kombinationen wurden einige Vorversuche gemacht, wobei die gesamte Durchbiegung mit Spiegel und Skale abgelesen wurde. Die Druckänderung fand teils momentan für das ganze gewünschte Intervall statt, teils in Stufen von 10 zu 10 cm Hg, um die Gleichförmigkeit der Bewegung zu studieren.

Vier kleinere Dosen: Umrechnungsfaktor von Skalen-mm auf mm Durchbiegung: ca. 1 : 702 = 0,00142; Mittel aus je zwei Beobachtungen.

Druckdiffer. cm Hg	0	10	20	30	40	50	60	70		
Skalen-mm	>330,2	301,8	273,1	244,6	215,6	186,6	157,6	--	Aufsteigende	Druckdiffer.
Differenz		28,4	28,7	28,5	29,0	29,0	29,0			
Skalen-mm	<330,3	301.9	273,2	244.7	215,8	186,7	157,8	128.8	Absteigende	
Differenz		28,4	28,7	28,5	28,9	29,1	28,9	29,0		

Die Versuche mit den drei größeren Dosen ergaben in Bezug auf Nachwirkung bei Druckänderungen von 50 cm nur minimale Verschiebungen bis zu einem Zwanzigstel Skalen-mm, was ja wohl auf die Art der Übertragung und Ablesung geschoben werden darf. Auch aus kleinen Differenzen der Werte beim Auf- und Abstieg in 10 cm-Stufen läßt sich wohl kaum ein Schluß auf eine wahrnehmbare Nachwirkung ziehen. Mehr zur Prüfung der Gleichmäßigkeit der Bewegung dienten folgende Versuche, von denen die Mittelwerte hier mitgeteilt seien. Der Umrechnungsfaktor ist etwa 1 : 391 = 0,0028.

Drei größere Dosen. Differenz in Skalen-mm.

Druckdifferenz abnehmend zunehmend		Druckdiff. cm Hg	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
	Intervalle in Skalen-mm	von 5 zu 5 cm Hg		—	—	14,0	15,0	14,0	15,0	14,1	15,0	14,2	15,3	15,3	14,4	15,0	15,0
		von 10 zu 10 cm Hg				29,0		29,0		29,1		29,5		29,7		29,9	
		von 5 zu 5 cm Hg	14,4	—	14,5	14,6	14 4	14,4	14,7	14,4	14,8	14,7	14,8	14,5	14,9	14,7	
		von 10 zu 10 cm Hg				29,1		28,8		29,1		29,5		29,3		29,6	

Zum Vergleich wurde von der Firma Gundelach in Gehlberg eine Kombination von 3 Glasdosen bezogen in ähnlichen Dimensionen wie die größeren Quarzdosen (Dosenhöhe 10 mm, Plattendurchmesser außen 46, innen 40 mm, Plattendicke 0,9 mm). Verwendet ist Jenaer Glas O 102; die Dosenringe und die Ansatzröhrchen sind aus anderem Glas und mit Emaille angekittet. Leider sprang bei den ersten Versuchen die eine Dose ab, so daß die genauen Versuche, deren Resultate hier folgen, mit 1 bezw. 2 Dosen gemacht wurden.

Umrechnungsfaktor $1 : 708 = 0{,}00141$.

2 Dosen:

Druckdiff.	0		50		0	
	531	— langsam →	457	— schnell →	528	dann minutenlange starke Änderung

1 Dose; Mittel aus je 3 Beobachtungsreihen:

		Verschiebung: Skalen-mm	Nachwirkung: mm nach ¼ Min.	½ Min.	1 Min.	2 Min.	3 Min.	4 Min.	6 Min.
auf eine Druckdiff. von	0—50 cm Hg	44	0,4	0,7	0,9	1,2	1,3	1,4	1,6
	50—0 cm Hg	43	0,6	1,0	1,3	1,7	1,9	2,1	2,3

3. Erste (doppelte) Hebelübertragung.

Nun wurden verschiedene Übertragungsmöglichkeiten durchprobiert. Vorher sei aber hier auf einige schon bisher existierende hingewiesen. Die stärkste Vergrößerung in der Bewegung erreichen wohl Crehore und Squier[1]) durch Interferenzstreifen, nämlich eine 50 000 fache. Das ist für unsere Zwecke aber doch zu viel, und eine Ablesung von Interferenzstreifen über ein weiteres Verschiebungsgebiet hinaus ist auch nicht mit der hier erwünschten Geschwindigkeit ausführbar. Eine sehr hübsche Methode beschreibt eine deutsche Patentschrift von 1913 (Nr. 260 160). Fast beliebige Übertragungswerte lassen sich bei geringster Reibung erzielen durch zwei an der Achse radial befestigte Magnete und einen in einer Schraubenwindung gewundenen Anker, der ringartig um die Magnete herumgelegt ist (s. Figur 2). Der eine

Figur 2.

Magnet muß natürlich gegen den ihm gegenüber befindlichen etwas in der Höhenlage verschoben angebracht sein. Senkt oder hebt sich nun die Achse mit den Magneten, so wird sie sich in einer oder der anderen Richtung drehen, um die Magnete in die Mittellage gegenüber dem als Anker dienenden Schraubenring zu bringen.

Hier ist die Übertragung in anderer Weise versucht worden, nämlich:

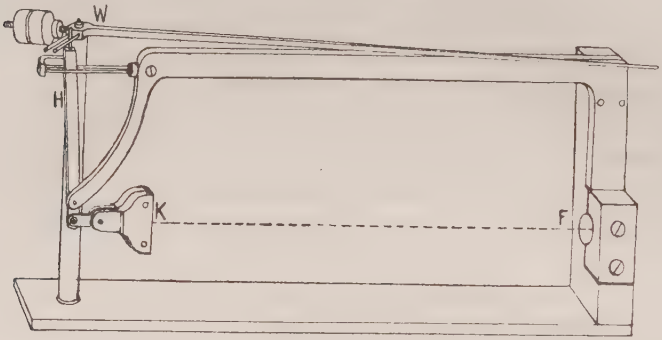
1. mit einem einfachen Hebelwerk,
2. mit einem einzigen fein geführten Zeiger,
3. mit direkter Ablesung im Mikroskop,
4. mit einer photographischen Aufzeichnung durch ein Mikroskopobjektiv hindurch.

---

[1]) Fortschr. d. Phys. 68 (1913), III., S. 484.

Diese Methoden mögen jetzt kurz besprochen und dann näher auf die 4., als die endgiltig angenommene, eingegangen werden.

Die Hebelanordnung der ersten Art wird aus Figur 3 ersichtlich:



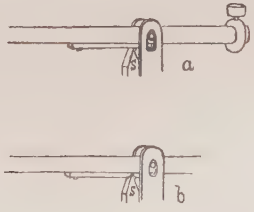
Figur 3.

Das offene Ende des Dosenapparates ist bei F festgeklemmt. Das verschlossene Ende ist in einem Kopf K eingeklemmt, der am Ende eines zweiarmigen Hebels H mit einer Übertragung von 3:31 angreift. Dieser wieder greift in einen Winkelhebel W, dessen langer Arm als Zeiger dient, und wo eine Übertragung von 1 : 20 oder später (durch Verlängerung des Zeigers) von 1 : 40. stattfand, so daß eine Gesamtübersetzung von 1 : 207 bezw. 1 : 414 zustande kam. Alle Teile wurden aus gutem Nickelstahl gefertigt, der eine sehr kleine thermische Ausdehnung zeigt (Koeffizient 0,000001). Störend und bis zuletzt nicht genügend zu beseitigen war hierbei aber die Reibung. Um sie nach Möglichkeit zu verringern, wurden als Achsen überall polierte Stahlnadeln verwendet, und die Verbindung des ersten Hebels mit dem Winkelhebel erhielt noch folgende besondere Gestalt (vgl. die Fig.). Der kurze Arm des Winkelhebels war aus zwei parallelen wagerecht von der Achse ablaufenden Nadeln gebildet, zwischen denen das Ende des ersten Hebels in Gestalt einer ebensolchen, senkrecht nach aufwärts zeigenden Nadel sich verschieben konnte. Hiermit war eine Verschiebung in beiden Horizontalrichtungen mit geringster Reibung erreicht, was bei den kurzen zur Anwendung kommenden Radien besonders notwendig

wurde. Aber trotz dieser Ausführung und guter Ölung waren die Ergebnisse ganz unzureichend: man erhielt einen so merklichen toten Gang, daß höchstens bei einseitiger Druckänderung etwas Brauchbares gefunden wurde. Der tote Gang erreichte etwa 10 % des Ausschlages für 60 cm Hg Druckdifferenz.

4. Zweite (einfache) Hebelübertragung.

Da diese Hebelübertragung also ungenügend war, wurde als einfachste Lösung ein einziger Hebel von größerer Länge und ausreichender Übersetzung gewählt. Hier trat nun die Schwierigkeit auf, das kurze Ende des Hebels in genügend kleiner und doch zugleich ausreichend genau definierter Länge herzustellen. Bei der Drehung kommt für eine so kurze Hebellänge (ca. $^1/_2$ mm) eine sehr merkliche Veränderung des Abstandes des Angriffspunktes vom Drehpunkt zustande, und diese muß berücksichtigt werden und darf nicht zum Ausgangspunkt für Fehler durch Veränderung der Lage bei der Wiederkehr gleichen Luftdruckes werden. Da gab es nun zwei Möglichkeiten, um die veränderliche Länge festzulegen. Entweder (s. Figur 4a) legt man nur



Figur 4.

den Drehpunkt fest durch Andrücken der feinen Zeigerachse (Stahlnadel) an zwei kleine Ösen[1]) zu beiden Seiten des Zeigers; dann erhält das obere Ende des Dosenapparates eine Schneide S, die sich bei der Bewegung unter dem frei aufliegenden Zeiger verschiebt. Oder (Figur 4b) man stellt außerdem auch eine feste Verbindung der Schneide mit dem Zeiger her, indem man die mit den Dosen verbundene Schneide in eine Kerbe eingreifen läßt. Die Unterstützungsstellen liegen

[1]) Diese sollen eine möglichst reibungsfreie Festlegung des Drehpunktes gewährleisten.

durch das Eigengewicht des Zeigers in konstantem Abstand voneinander, so daß jetzt bei der Bewegung die Dosen seitlich nachgeben müssen — was aber stets um einen bestimmten Betrag stattfinden wird, sobald der Abstand als fest betrachtet werden darf. Der Zeiger war zuerst aus dünnem Stahl, wurde aber bald durch einen solchen aus Aluminiumdraht und dann durch einen aus zusammengerolltem Aluminiumblech ersetzt. Durch ein kleines verschiebbares Gegengewicht wurde das nötige Übergewicht des Zeigers reguliert.

Die Unterschiede der Einstellung beim Hin- und Rückgang betrugen beim Stahlhebel in höheren Drucklagen etwa $\frac{1}{10}$ der Gesamtbewegung auf 60 cm Quecksilberdruck-Differenz, in niederen Drucklagen sogar fast das Doppelte. Beim Aluminiumhebel mit festgelegtem Abstand von Schneide und Achse etwa $\frac{1}{50}$ jener Gesamtbewegung; bei veränderlichem Abstand bis $\frac{1}{25}$ und bei stärkerem Übergewicht viel weniger; in den niedersten Lagen war teilweise gar keine Abweichung wahrnehmbar.

Diese Resultate waren durchaus ungenügend, und besonders für die Anordnung mit verschiebbarer Schneide kam eine große Unregelmäßigkeit beim An- und Abstieg zustande. Daher wurde eine Führung für das obere Ansatzrohr ins Auge gefaßt. Wenn es sich erreichen ließ, daß dieses Ende sich bei der Längsverschiebung nicht merklich aus seiner Achsenrichtung verrückte, so war bei hinreichend geringer Reibung ein gutes Resultat zu erwarten. Als beste Lösung kam ein Glaszylinder in Frage, der genau in eine Glasführung eingeschliffen und mit etwas Fett fein beweglich gemacht war. Auf eine Anfrage erklärte sich die Firma Zeiß in Jena bereit, eine solche Führung zu liefern. Aber alle Versuche ergaben leider entweder eine zu große Reibung oder eine zu geringe Genauigkeit der Führung. Letztere war natürlich überhaupt kaum zu erreichen, da es hier wegen des anzuwendenden außerordentlich kurzen Hebelarmes auf Werte von wenigen Hunderteln Millimeter ankam.

Der tote Gang erreichte jetzt zuerst etwa $\frac{1}{7}$ des Ausschlages für 40 cm Hg Druckdifferenz, wurde für eine etwas stärkere Übersetzung und zugleich stärkeres Übergewicht besser und ließ

sich bei gutem Reinigen und Ölen der Führung bis auf unter $\frac{1}{30}$ dieses Ausschlages herabdrücken.

Von einer weiteren Ausgestaltung der Glasführung — etwa so, daß nur drei im Kreise angeordnete Führungskanten hergestellt wurden — konnte unter diesen Umständen abgesehen werden, und man mußte nach weiteren Methoden für eine ausreichend feine Übertragung suchen. Nun waren weitere zwei Arten möglich, die — im Gegensatz zu den bisherigen — notwendig beide eines genügenden Ausbaues fähig sein mußten wegen des verwendeten Prinzipes, jede Reibung zu vermeiden durch Benutzung eines beweglich gemachten Lichtstrahles.

5. Mikroskopische Ablesung.

Mit der direkten Beobachtung sind eine Anzahl Versuche gemacht worden, ohne jedoch die Methode vollständig bis zu praktischer Vollkommenheit durchzuführen. Es ergab sich nämlich bald, daß eine scharfe Einstellung zum Ablesen jedesmal neu auszuführen war und dann mehr Zeit erforderte, als es dem Zweck des Apparates — momentanes Anzeigen des herrschenden Druckes — entsprach. Bevor aber die Versuche zur Lösung dieses Problems besprochen werden, seien einige nähere Angaben über die angewendeten Mikroskope gemacht.

Da die wirkliche Bewegung der Dosen ja nur sehr gering ist — für die 3 größeren etwa 0,58 und für die 4 kleineren gar nur 0,29 mm auf 70 cm Quecksilberdruckdifferenz — so muß eine sehr starke Vergrößerung angewendet werden. Will man z. B. halbe Millimeter Hg noch schätzen können, so ergibt sich folgende Rechnung:

Die 3 größeren Dosen bewegen sich pro mm Hg um ca. 0,0008 mm. Rechnet man mit der Möglichkeit, Zehntel Millimeter einer Skale noch richtig schätzen zu können, so müßte man mindestens 250 mal vergrößern.

Tatsächlich sind oft bedeutend stärkere Vergrößerungen angewendet worden. Zumeist wurden als Objektive benutzt die Zeiß-Achromate „C“ und „D“; als Okulare dienten die orthoskopischen Zeiß-Okulare Nr. 6 und 7, die ein besonders großes Sehfeld haben. Probiert wurden auch andere Zusammenstellungen, und zwar kam hinzu das Objektiv „B“ und die Kompensations-

Okulare „8“ und „12“ und die Huygensschen Okulare „3“, „4“, „5“. Die optischen Daten sind folgende:

Bezeichnung		angenäherte Vergrößerung	Aequivalent-Brennweite: mm	Numerische Apertur
Achromat	B		12	0,35
	C		7	0,40
	D		4,2	0,65
Huygens-sches Okular	3	5,5	30	
	4	7	25	
	5	9	20	
Orthosko-pisches Okular	6	12	15	
	7	20	9	
Kompen-sations-Okular	„8“	8	21	
	„12“	12	15	

Die Vergrößerung wird für 160 mm Tubuslänge:

	3	4	5	6	7	„8“	„12“
B	110	130	180	225	360	ca. 150	ca. 225
C	180	225	300	370	590	„ 246	„ 370
D	330	385	550	680	1100	„ 454	„ 680

Als Marke für die Ablesung diente ein von der Firma Zeiß auf einem Spiegelglasplättchen mit Diamant eingeritztes Kreuz, dessen Striche eine Länge von annähernd 2 mm und eine Dicke von annähernd 0,002 mm besaßen. Sie erscheinen bei der stärksten angewandten Vergrößerung (Obj. D mit Ok. 7) etwa 2 mm dick und haben auch dann deutliche, recht gerade Kanten.

Aber es kommt nicht nur darauf an, daß trotz der starken Vergrößerung eine deutliche Ablesung möglich bleibt; auch die Größe des Gesichtsfeldes und die erreichbare Feinheit der Bildeinstellung spielen eine Rolle, indem sie der Anwendung starker Vergrößerungen störend entgegenstehen.

Was zunächst das erreichbare Gesichtsfeld anlangt, so zeigt die folgende Tabelle eine Zusammenstellung für die wichtigsten Vergrößerungen. Dabei ist stets die Zahl der cm Hg-Druckdifferenz notiert, für deren Grenzen die Marke gerade beiderseits den Rand des Sehfeldes berührt. Benutzt sind die drei großen Quarzdosen und als Mikroskop ein Tubus von 160 mm Länge.

Ferner sind in 2 weiteren Tabellen für beide Dosengruppen die Bereiche der Mikrometerskale in cm Hg für die kürzeste Tubuslänge von 137 mm festgestellt. Das Okular-Mikrometer enthält 5 mm in je 20 Teile geteilt und ist im Okular 7 (Vergrößerung ca. 20fach) befestigt.

Objektiv	Okular	Gesamt-Vergr.	Okular-Vergr. annähernd	Sehfeld-bereich in cm Hg
B	Orthosk. 7	360	20	51
C	„	590	20	31
C	Huygens. 5	300	9	57,5
D	„	550	9	30,5
D	Huygens. 4	385	7	32,5

Die drei größeren Dosen ergaben:

für Objektiv	ein Intervall von cm Hg: bei Tubuslänge von:	
	137 mm	160 mm
B	48,8	41,5
C	29,5	25,1
D	16,2	13,8

und die vier kleineren Dosen bei Tubuslänge 137 mm:

für Objektiv	ein Intervall von
C	56
D	30 cm Hg.

Diese Zahlen, dividiert durch 100, geben für jeden Fall die Anzahl cm Hg, welche einem Skalenteil entsprechen.

Die Angaben zeigen, daß stets ein ziemlich unvorteilhafter Kompromiß geschlossen werden muß zwischen der Vergrößerung und dem Bereich des Sehfeldes. Die Vergrößerungen schwanken in der Tabelle zwischen 300 und 600, und einem Millimeter der Skale entsprechen 2 bis 4 mm Quecksilberdruck. Das größte Sehfeld erscheint immer beim Okular 7, und dieses ist wegen der starken Vergrößerung auch besonders vorteilhaft in anderer Beziehung: man kann bei seiner Verwendung am ehesten auf stärkere Objektive verzichten. Je stärker aber ein Objektiv, desto mehr zeigt es ja die unangenehmen Eigenschaften, daß man es sehr nahe ans Objekt bringen muß, und daß die geringste Änderung des Abstandes die Bildschärfe stark beeinträchtigt und die Bildgröße verändert. Die Güte des Skalenbildes war an sich auch beim stärksten Okular 7 noch ausreichend, so fein ist das verwendete Okularmikrometer 5 mm/100 hergestellt.

Da eine jedesmalige Einstellung des Mikroskopes für die einzelnen Ablesungen doch nicht zweckentsprechend ist, wurde zwischen die Dosen und die Marke eine von Zeiß bezogene Glasführung eingeschaltet, die schon oben (S. 30) beschrieben worden ist. Die Führung ließ sich aber nicht so fein erhalten, daß eine hinreichende Sicherheit erreicht wurde, ohne dabei eine sehr merkliche Reibung entstehen zu lassen. Das Bild hatte fast immer eine genügende Schärfe; aber die Reibung zeigte sich deutlich im Zurückbleiben der Bewegung. Die größte erreichbare Genauigkeit war derart, daß der von der Reibung beanspruchte Spielraum reichlich 2% der Verschiebung für 10 cm Hg betrug.

So wurden denn auch Versuche ohne jegliche Führung gemacht. Man dachte auch an einseitige Führungen; diese sind aber nicht angewandt worden, da auch bei ihnen die Reibung nicht genügend hätte beseitigt werden können. Nur praktisch völlige Reibungslosigkeit konnte ausreichend sein.

Ohne Führung mußte zunächst das Mikroskop für jede Ablesung neu eingestellt werden. Es gab aber noch einen Weg, dieses Einstellen nach Möglichkeit zu vermeiden. Die Bewegung des oberen Endes der Dosen fand praktisch in einer Geraden statt. Die Gerade konnte annähernd parallel zur Skale gerichtet werden. Wählte man nun eine mittlere Einstellung, so ließen sich die äußersten zu wählenden Lagen noch annäherungsweise ablesen. Wenigstens ließ dies auch bei ziemlich starker Vergrößerung noch bei den 4 Dosen ausführen, die ja eine geringere

Beweglichkeit besaßen. So ergaben sich folgende Resultate, welche auch die große Gleichförmigkeit der Bewegungen erkennen lassen:

Intervalle in Millimetern des Okularmikrometers bei ca. 20-facher Vergrößerung derselben:

1. 4 Dosen, Okular 7, Objektiv C:

Druckgrenze cm Hg	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Skalen-Intervall	0,44	0,45	0,45	0,45	0,45	0,44	0,45	0,45	0,45	0,46	

2. dasselbe, nur Objektiv D statt C:

Druckgrenze cm Hg	0	5	10	15	20	25	30
Skalen-Intervall	0,81	0,80	0,81	0,81	0,81	0,81	

Außerdem aber war hier noch etwas zu bedenken: Falls die Dosen nicht gut senkrecht stehen, werden sie von der Schwerkraft in einer gewissen Richtung zur Seite gezogen. Hier ließen sich also Versuche darüber anstellen, wie stark der Apparat wegen seines Gewichtes von der Schwerkraft beeinflußt wird. Die Befestigung der Dosen wurde durch einen Metallring und Schrauben möglichst starr gemacht, so daß sie wohl ohne merklichen Einfluß auf die Neigung des oberen Endes blieb, indem das untere Ende sich nicht irgendwie merklich mitbewegte. Die Neigung wurde in der Weise ausgeführt, daß die gemeinsame Unterlage für Dosen und Mikroskop auf drei Füße gestellt ward, deren Länge sich in weitem Spielraum ändern ließ. Auf diese Weise wurde eine Neigung von 10 und 20° bewirkt. Die Versuche hatten folgendes Ergebnis:

Intervalle in 20fach vergrößerten Millimetern des Okular-Mikrometers bei Objektiv C und Okular 7:

Druckgrenzen in cm Hg:	für 3 größere Dosen 0	10	20	30	für 4 kleinere Dosen 0	20	40
Ohne Neigung:	1,69	1,72	1,71		1,79	1,79	
hinten hoch 10°:	1,68	1,71	1,71		1,79	1,79	
vorn hoch 10°:	1,69	1,71	1,70		1,78	1,79	
links hoch 20°:	1,68	1,70	1,70		1,79	1,79	
rechts hoch 20°:	1,69	1,70	1,69		1,79	—	

Bemerkung: „hinten“ bedeutet: das Ende, wo Objektiv und Dosen sind; „vorn“ bedeutet: das Ende, wo das Okular ist; „rechts“ und „links“ aus der Sehrichtung gedacht.

Also ein merklicher Einfluß der Schwerkraft ist nicht zu finden; die teilweise abgelesene minimale Erhöhung des Wertes für die ungeneigte Lage ist innerhalb der Grenze der Beobachtungsfehler.

6. Photographische Aufzeichnung.

Wenn auch mit der eben beschriebenen Methode direkter mikroskopischer Ablesung zum ersten Mal eine hinreichende Genauigkeit erzielt werden konnte, so mußte diese andererseits jedoch damit erkauft werden, daß die Feststellung der Werte sich nicht immer momentan bewirken ließ, da oft eine Verstellung des Mikroskopes oder doch sehr genaues Hinsehen und sorgsame Schätzung an der Skale nötig war, um die Genauigkeit zu erreichen. Immerhin ließe sich auf dieser Methode ein brauchbares Instrument für direkte Ablesung aufbauen, das bis zu einer ausreichenden Feinheit vervollkommnet werden könnte (vgl. S. 52 f.). Hier sind vorläufig nur die Grundlagen dafür gegeben; eine praktische Ausführung bleibt vorbehalten. Es läßt sich nämlich noch in anderer Weise ein gleich gutes Resultat erreichen:

Man vermeidet das genaue Beobachten und läßt statt dessen die anzuzeigenden Werte unter Ausschluß jeder störenden Über-

tragung aufzeichnen. Dies läßt sich, da jede Störung durch Hebel und dergleichen vermieden werden muß, nur auf photographischem Wege machen.

Die Strahlen einer Lichtquelle müssen an einer Marke vorbei zu einem bewegten lichtempfindlichen Papier geleitet werden. Das Papier[1]) wurde, wie üblich, auf eine langsam rotierende Trommel gespannt. Anfangs hatte diese einen Umfang von 29,6 cm und etwa eine Umdrehung in 24 Stunden (sie war einem Barographen entnommen). Später wurde ein größerer Umfang gewählt, wie weiter unten (S. 41) berichtet werden wird. Die Trommel war von einem Mantel aus schwarzer Pappe umgeben, der in ein Ansatzrohr auslief, welches fast lichtdicht in das Okularende des Tubus eingeschoben werden konnte. Außerdem wurde alles in ein schwarzes Tuch gehüllt. Zur Vergrößerung diente das Objektiv C oder D. Als Marke diente teils jenes von Zeiß hergestellte feine Strichkreuz, teils eine scharfe gerade Kante, teils ein sehr feines Loch. Die Lichtquelle war entweder eine 25-Kerzen-Lampe oder eine kleine 4-Volt-Lampe oder endlich eine Nernstlampe, falls große Helligkeit nötig war. Das Licht wurde durch eine Linse konzentriert. Da die Marke nicht über dem die Dosen oben abschließenden Quarz-Rohrstutzen angebracht war, sondern — von der Lichtquelle aus gerechnet — hinter dem Rohr, so konzentrierte das Rohr das Licht noch dicht hinter sich, an der Stelle, wo sich die Marke befand. Das geschah freilich nur in der wagerechten Richtung; aber eine senkrecht zum Rohr gestellte Zylinderlinse erwies sich als unvorteilhaft und wurde wieder weggelassen.

War die Marke von der Art, daß eine größere Lichtmenge an ihr vorbeikonnte — also nicht ein Loch in lichtundurchlässiger Umgebung — so mußte natürlich vor das lichtempfindliche Papier noch ein Spalt vorgeschaltet werden. Sowohl Spaltbreite wie Lichtstärke waren regulierbar.

Die Größenverhältnisse bei der kleineren Trommeleinrichtung waren im übrigen folgende. Der Tubus mit aufgeschraubtem Objektiv C oder D (Länge bei beiden 33 mm) war 121 mm lang. An Stelle des verschiebbaren Okularteiles schloß sich hieran, mittels eines beweglichen Zwischenrohres angesetzt, das Ansatzrohr des

[1]) Hochempfindliches Bromsilber-Registrierpapier von Scheuffelen in Heilbronn a. N.

um die Trommel gelegten Pappmantels; seine Länge bis zum lichtempfindlichen Papier betrug 170 mm.

Die Versuche hatten nun hauptsächlich folgende Ergebnisse:

Bei einer 3 kerzigen Lampe im Abstand von reichlich 10 cm ohne Linse ergab sich die Abbildung des Striches als helles Bild auf dunklem Grunde am schärfsten bei 2 bis 6 sec Belichtungsdauer. Wollte man also eine solche Lampe benutzen — sie ist wegen der Kleinheit der benötigten Stromquelle recht vorteilhaft — so mußte bei der oben angegebenen Geschwindigkeit des lichtempfindlichen Streifens der Spalt etwa $^1/_{20}$ mm breit sein. In ziemlich dieser Größenordnung konnte er auch gehalten werden und ergab bei der Rotation der Trommel einen — freilich recht wenig scharfen — hellen Streifen auf dunklem Grunde. Gleichzeitig entstand aber, weil der Spalt nicht überall gleich breit war und auch nicht frei von Staubteilchen gehalten werden konnte, eine aus vielen Parallelstreifen bestehende Schattierung, die jede Zeichnung beeinträchtigte. Daneben entstanden auch senkrecht zur Bewegungsrichtung durch die ganze Bandbreite sich ziehende gerade Streifen in gleichen Abständen. Es mußte also jedenfalls das Uhrwerk durch Unregelmäßigkeiten in den schneller laufenden Rädern periodische Geschwindigkeitsänderungen aufweisen. Ändern ließ sich das nicht, war aber auch ganz praktisch zur Feststellung von Zeitpunkten auf dem Papierstreifen.

Um eine schärfere Linie zu erhalten, wurde an ein Messingplättchen eine gerade Kante angefeilt und dieses dann an dem Quarzrohr befestigt. Das Bild mußte jetzt einen hellen und einen dunklen Teil aufweisen, zwischen denen sich als Grenze die Barometerkurve befand. Hier ließ sich auch — was ja bei der vorigen Art der Abbildung nicht direkt möglich war — eine Skale anfügen, die ja zu einem fertigen Apparat gehört. Man brauchte einfach vor den Spalt eine durchsichtige Skale zu bringen. Eine Reihe kurzer dunkler Striche genügte und ergab als Abbildung helle Linien auf dem dunkel gewordenen Teile des Papierstreifens. Damit erreichte man von selbst, daß die Stellung der Skale zur gezeichneten Kurve überall konstant blieb; dies wäre natürlich nicht ohne weiteres der Fall, wenn die Skale getrennt von der photographischen Aufzeichnung auf das Papier gebracht werden müßte. Außer diesem Vorteil zeigte sich auch hier die bequeme Festlegung der Zeitmarken in der oben dargelegten Art durch die ungleichförmige Bewegungsgeschwindigkeit. Aber so scharf auch

diese Längs- und Querstreifen herauskamen, die bewegliche Marke ward nie ganz ausreichend scharf abgebildet (s. Fig. 5). Die nötige Schärfe ließ sich nie für alle auftretenden Lagen erreichen, weil die Beugung des Lichtes leicht störte.

Eine weitere Quelle ungenauer Ablesbarkeit war die geringe Neigung der aufgezeichneten Kurve zu den Skalenlinien; die Ecken der so entstehenden verhältnismäßig engen Winkel ließen sich nur ungenügend scharf lokalisieren, vor allem in der wagerechten, dem Zeitablauf entsprechenden Richtung.

Noch eine Form der Marke war möglich, welche diese Beugungsstörungen vermied. Wenn auch die Beugung nicht aufgehoben werden kann, so läßt sie sich doch derart auf alle Richtungen verteilen, daß sie nicht durch einseitiges Wirksamwerden stören kann. Dazu braucht man nur das Licht durch ein feines Loch zu schicken; das Bild wird einen hellen Punkt, eventuell mit gleichmäßig herumliegendem Beugungsrand, ergeben; die Mitte des Punktes wird gut feststellbar sein.

Die Herstellung solcher Löcher von genügender Kleinheit war recht schwierig. Zuerst wurde als Material dünnes Kupferblech genommen, eine feine Stahlnadel darauf gesetzt und durch schwachen Schlag hineingestoßen. Die Unterlage war verschiedenartig. Die auf diese Art erzielten Löcher waren aber nie kleiner als $^1/_{200}$ mm. Und das reichte nicht, weil eine mindestens 100fache Vergrößerung nötig war und der Lichtpunkt doch höchstens 0,2 mm Durchmesser haben durfte, die Beugungserscheinungen mitgerechnet. Um soweit zu kommen, wurde ein an sich nicht sehr solides Material gewählt: ein dünnes Stanniolblättchen. Ferner fanden sich unter einer größeren Zahl der kleinsten erhältlichen Nähnadeln („Ellips Halblange Nr. 10“ von Lammertz) immerhin einige, deren äußerste Spitze gegen $^1/_{700}$ mm fein war. Eine solche Nadel wurde nun an einem Ende eines kurzen, leicht drehbaren zweiarmigen Hebels senkrecht festgeklemmt; das andere Ende trug ein verschiebbares Gewichtchen, das der Nadel nur ein schwaches Übergewicht ließ. Das Stanniolblättchen kam auf eine Zinkunterlage, und nun wurde die Nadel aus wenigen Millimetern Höhe auf das Stanniol fallen gelassen, um sofort beim Rückstoß wieder abgefangen zu werden. Hierbei schlug die Nadel entweder ein kleines Loch in das Stanniol, oder vielleicht blieb einfach ein Stückchen des Metalls an der Nadel haften. Es war jedenfalls möglich, recht gleichmäßig runde Löcher von

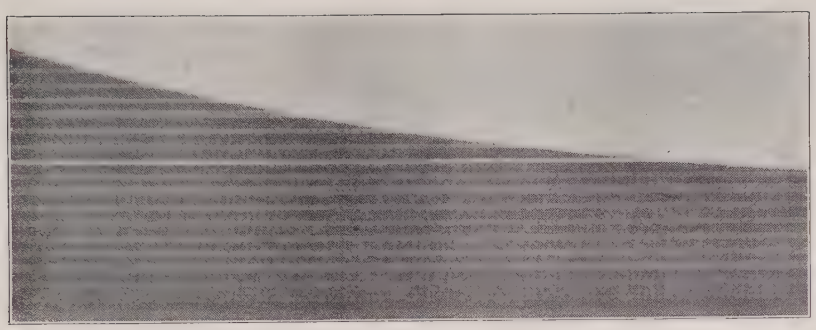
einem Durchmesser bis etwa $^1/_{1500}$ mm hinab zu erzeugen. Natürlich hing es noch von den einzelnen Umständen ab, ob das Loch gerade eine brauchbare Größe erhielt; dies gelang immer nur bei einem unter mehreren Versuchen.

Bei so kleinen Löchern ließen sich leider auch die gewöhnlichen Lampen nicht ohne weiteres anwenden. Es wurde — wenigstens bei dem Objektiv D — unbedingt eine Nernstlampe nötig, deren Licht für die erwähnte Geschwindigkeit des lichtempfindlichen Papieres nicht zu stark war. Später, bei Verwendung empfindlicherer Dosen, war es möglich auf das Objektiv C zurückzugreifen, und da ließ sich eine 4-Kerzen-Lampe mit geeigneter Linse davor benutzen. Eine solche Lampe — es wurden verschiedene Formen probiert — ließ sich an 2 Akkumulatoren anschließen, die bei leichter Bauart auch im Ballon mitgenommen werden könnten. Auch ein Akkumulator könnte ausreichen, wie am Schluß bemerkt (S. 52).

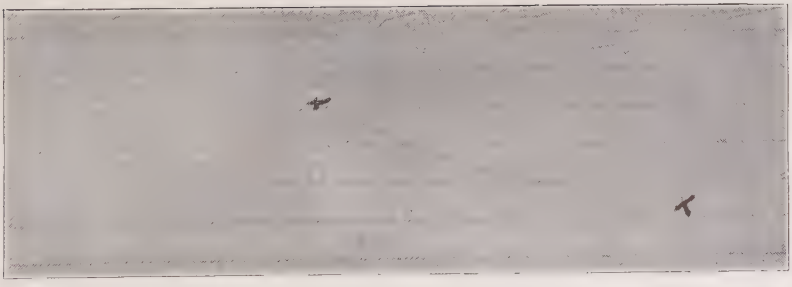
Nun zu den Versuchen im einzelnen:

Zuerst wurden auch bei unbewegtem Film einige Versuche gemacht, die bewiesen, daß die Bewegung der Marke tatsächlich innerhalb der Grenze der Ablesungsschärfe gradlinig verlief. Sobald man dabei die Ebene, in der die Bewegung vor sich ging, annähernd parallel dem Film einstellte, mußte natürlich die als Bild bei der Druckänderung entstehende Gerade im allgemeinen geneigt sein. Diese Neigung betrug bei den hauptsächlich benutzten Dosen annähernd 15°, was für eine dann gleichbleibende Bildschärfe gern in Kauf genommen, für den praktischen Gebrauch aber auch nach der S. 46 und 51 genannten Art beseitigt werden kann.

Dann kam es darauf an, eine Skale herzustellen. Da das Licht das Papier nirgends außer an der Stelle des Markenbildes trifft, so kann es nicht zugleich zur Erzeugung der dazu gehörigen Skale verwendet werden. Diese muß vielmehr getrennt von jenem photographischen Prozeß erzeugt werden unter besonderer Berücksichtigung dessen, daß sie jetzt nicht von selbst die richtige Lage zum Markenbilde hat. Sondern diese Lage muß sie bei ihrer Herstellung besonders erhalten, oder die Abweichung ihrer Lage muß bekannt und durch Rechnung oder Konstruktion zu beseitigen sein.



Figur 5.



Figur 6.

Am geeignetsten erschien es nun, auf das lichtempfindliche Papier zuerst eine Skale aus feinen dunklen Strichen auf hellem Grunde zu photographieren, es darauf der Belichtung am Barometer auszusetzen und zum Schluß zu entwickeln. Hierbei wurde es möglich, für jeden Apparat eine individuelle Skale, von geeignetem Linienabstand, in Gestalt einer Negativplatte herzustellen. Um genügend feine Striche zu erhalten, wurde anfangs mit der Reißfeder auf einzelnen Kartonstücken in Teilen eine Skale von über 3 m Länge und 5 mm Linienabstand gezeichnet. Die Teile wurden auf eine Holzunterlage geklebt, die wegen der optischen Eigenschaften des im übrigen vorzüglichen photographischen Objektivs (Zeiß' Planar 1 : 4,2; F = 300 cm) eine praktisch ausprobierte Krümmung besitzen mußte: ihre Mitte mußte aus der den Linsen parallelen Ebene näher ans Objektiv heran-, ihre Enden weiter von ihm zurücktreten, damit das Bild überall von gleicher Größe erschien. Auf diese kam es vor allem an; die Schärfe wurde dabei nicht überall gleich, weil bei der Linse für Schärfe und Größe des Bildes nicht die gleichen Gesetze gelten, besonders für größere Öffnungswinkel. Schließlich war aber doch eine größere Schärfe erwünscht und besser ohne zu große Beeinträchtigung der Strichfeinheit erzielbar, wenn man mit demselben Objektiv nur auf die Hälfte statt auf ein Fünftel verkleinerte, wobei ein kleinerer Öffnungswinkel benutzt wird. Die Skale wurde also nur in doppelter Größe, dafür aber mit möglichst feinen Linien gezeichnet. Damit wurde ein recht scharfes Bild auf eine Länge von gegen 40 cm erzielt; in seiner weiteren Fortsetzung allerdings wurde das Bild schlechter in der Größe und besonders in der Schärfe. Das Bild der Marke konnte ziemlich scharf auf dieser untergelegten Skale erhalten werden, der auf 0,55 mm einem cm Hg entsprachen (s. Fig. 6).

Bei den hier näher mitgeteilten Versuchen mit Kante oder Loch als Marke ist übrigens eine größere Trommel benutzt worden. Diese hatte einen Umfang von etwa 471 mm und lief mit einer Umfangsgeschwindigkeit von 19,6 mm bis 20,0 mm pro Stunde, je nach Einstellung des Zeigers an der Unruhe. Der Abstand des Papieres vom äußeren Ende des Ansatzrohres der Papphülle betrug hier 108 mm; dazu kam der Mikroskoptubus wie oben (Seite 37) beschrieben.

Hier sei noch eine Bemerkung hinsichtlich der Bildschärfe angefügt. Diese ändert sich natürlich mit dem Abstand des Objektes vom Objektiv. Es ergab sich, daß beim Objektiv B jener Abstand ruhig um 0,02 mm geändert werden durfte, ohne die Schärfe des Bildes zu schädigen; für Objektiv C um ziemlich 0,01 mm.

IV. Einzelheiten zur Justierung des Apparates.

1. Temperaturveränderung.

Wenn nun auch mit dieser Anordnung recht gute Resultate erzielt werden konnten, so bedurften für die praktische Ausführung doch noch einige Punkte der Klärung; und zwar zunächst prinzipiell der Einfluß von Temperaturveränderungen und dann die Anordnung der Zeitmarken und die Vermeidung einer zu schiefen Bewegungsrichtung der Dosen. Was den Einfluß der Temperatur anlangt, so kennt man bisher zwar deren Wirkung auf die Dehnung, aber anscheinend nicht den Einfluß auf die Elastizität selbst. Solche Versuche wurden hier nicht allgemein und vollständig durchgeführt, sondern nur mit Rücksicht auf die Brauchbarkeit eben der zu verwendenden Quarzdosen. Dazu diente die folgende Anordnung.

Auf einer Marmorplatte, die eine feste Aufstellung und dabei einigen Schutz gegen Wärmeaustausch gibt, wurden die Dosen und das Mikroskop (ohne Okular) montiert. Unabhängig davon wurde eine Mattglasskale in 86 cm Abstand vom Objekt aufgestellt. Die Dosen trugen als Marke ein Stanniolblättchen mit einem kleinen Loch, durch welches das mittels einer Linse konzentrierte Licht einer 4-Volt-Lampe auf die Skale fiel. Die Ebene, in der die Bewegungslinie des Loches lag, stand vertikal; die Linie selbst war geneigt, und die gleiche Neigung erhielt die Skale. Das Luftzuführungsrohr zu den Dosen ging durch ein Loch in der Marmorplatte, das durch Zustopfen um das Rohr herum gegen Wärmeaustausch geschützt wurde. Über die Dosen war ein doppelwandiges Metallgefäß gesetzt, das in Höhe der Marke einen einwandigen vorspringenden Teil hatte mit zwei Glasfensterchen, einem für die Lichtzufuhr und einem als Durchlaß für das Licht zum Objektiv. Außerdem ließ sich in diesen vorspringenden Teil ein Thermometer einführen, das also in den

inneren Hohlraum ragte, in dem sich auch die Dosen befanden. Durch den äußeren Hohlraum des Gefäßes konnte Dampf geleitet oder flüssige Luft gespritzt oder auch zur schnelleren Erreichung der Zimmertemperatur mit der Luftpumpe Luft geblasen werden. Die Konstanz der Temperatur ließ sich außerdem durch das Quecksilbermanometer kontrollieren, dessen Luftraum mit dem Doseninnern in Verbindung stand.

Um kleine Schwankungen im Abstand der Marke von dem Objektiv unschädlich zu machen, wurde das Objektiv B benutzt trotz dessen geringerer Vergrößerung; denn hier konnte der Objektivabstand groß genug gewählt werden. Die Genauigkeit betrug mindestens $\frac{1}{500}$ des ganzen angewandten Druckbereiches (0 cm bis 60 cm Hg), indem die ganze Bewegung sich auf etwa 51 cm der Skale verteilte und annähernd noch Zwanzigstel mm geschätzt werden konnten. Dazu kam freilich, daß der Tubus zuweilen verschoben werden mußte, und zwar bis zu 0,01 mm, was aber einer Veränderung der erwähnten Skalendifferenz von annähernd nur $\frac{1}{20}$ mm gleichkommt. Wie man sieht, liegt dieser Wert von etwa $\frac{1}{1000}$ der ganzen Verschiebung in der Nähe der Ablesungsgenauigkeit, so daß die Gesamtgenauigkeit, als Summe beider, zu $\frac{1}{500}$ angenommen werden kann. Wegen der Bildschärfe vgl. Seite 42.

Die Versuche ergaben folgende Werte als Differenz auf der Skale, entsprechend einer barometrischen Differenz von 60 cm gegen 0 cm Hg:

Temperatur	18° vor der Erhitzung		97°		20° nach der Erhitzung	
	Anstieg	Abstieg	Anstieg	Abstieg	Anstieg	Abstieg
Einzeldifferenzen auf der Skale in mm	51,6	51,6	50,8	50,8-9	51,5	51,4-5
	51,6	51,7	50,9	50,9	51,5	51,5
	51,7	51,7	50,9	50,9	51,5-6	51,5
Mittel	51,63	51,67	50,87	50,88	51,52	51,48

Gesamtmittel:	19°	97°
	51,58	50,88

Also tritt für beinahe 80° Temperaturunterschied bei einem Gesamtwert von 51,58 mm eine Verschiebung um 0,7 mm ein, das ist um 1,3 %.

Eine weitere Versuchsreihe für die halbe Druckdifferenz, also für 30 cm und 0 cm Hg, ergab als Mittel für etwa 19° auf der Skale 25,15 mm, für 97° 24,70 mm, das ist eine Verminderung um 0,45 mm oder um 1,8 %. Dieser Messung ist allerdings eine geringere Genauigkeit zuzubilligen, weil sie sich ja nur auf den halben Bereich erstreckt hat. Da außerdem wegen der stets zweimaligen Ablesung mit einer Ungenauigkeit der gefundenen Werte von 0,1 mm gerechnet werden muß, kann der angegebene Unterschied um $\frac{1}{4}$ seines Wertes unsicher sein.

Versuche bei tiefen Temperaturen bis — 55° ergaben auf ein Temperaturintervall von reichlich 70° wieder jene Differenz von 0,7 mm auf den Gesamtunterschied von 5,1 cm, also wieder 1,3 %; so scheint das der wirkliche Prozentsatz zu sein, und er scheint bei wechselnden Temperaturlagen annähernd konstant zu bleiben.

Wichtig ist, daß bei steigender Temperatur der Wert der Gesamtänderung nicht zunimmt, sondern sich verringert. Denkt man sich also die Dosen luftleer, so werden sie bei einem gegebenen Luftdruck eine gewisse Abweichung von ihrer ungespannten Stellung (der Stellung für gleichen Innen- und Außendruck) zeigen, in höherer Temperatur aber bei demselben Luftdruck eine geringere Abweichung. Hätte man etwas Luft in den Dosen gelassen, so würde diese in höherer Temperatur einen stärkeren Innendruck ausüben und dadurch jene Abweichung noch mehr verringern, anstatt sie zu verstärken. Also ist dieses Mittel zur Kompensation, das man nicht selten bei Aneroiden anwendet, hier nicht brauchbar. Durch eine um den ganzen Apparat gelegte wärmeundurchlässige Schicht läßt sich auch kaum etwas erreichen, da sie entweder den Druck schlecht übertragen oder die Temperatur in einem ganz unkontrollierbaren Grade verändern würde. Am zuverlässigsten ist jedenfalls, die Temperatur einfach mit aufzeichnen zu lassen — was ja überhaupt häufig geschieht — und aus ihr die Korrektion für den betreffenden Apparat mittels einer Tabelle zu entnehmen, die für jede Temperatur die vom angegebenen Wert abzuziehenden Prozente enthält.

Endlich ist zu beachten, daß die Neigungen der Bewegungsrichtung für höhere und für tiefere Temperatur nicht ganz zusammenfallen; dem kann man durch Verbinden zweier Dosengruppen abhelfen, wie am Schluß (S. 51 f.) ausgeführt.

2. Zeitmarken.

Neben der bloßen Aufzeichnung der Bewegung auf das photographische Papier muß eine Festlegung der zu ihr in Beziehung stehenden Zeiten stattfinden. Oben (Seite 38) ist schon der zufällige Vorteil erwähnt worden, daß bei der Belichtung einer größeren Fläche des Papieres sich die ungleichförmige Bewegung der Trommel in einer als Zeitmarken verwendbaren Streifung des Papieres darstellt. Bei der Aufzeichnung einer einzigen Linie durch ein feines Loch fällt diese Möglichkeit der Markierung fort. Man kann aber immer noch das Photographieren mit dazu verwenden, indem man zum Beispiel zu bestimmten Zeiten mittels elektrischer Kontakte die Lampe für Augenblicke verlöschen läßt, so daß die Linie eine Unterbrechung erleidet. Man kann mit der dreikerzigen Lampe und der ausreichenden Vergrößerung des Objektivs C noch bei Bewegungsgeschwindigkeiten bis ziemlich 1 mm/Min. ausreichend scharfe und feine Bilder erhalten, um eine Unterbrechung von vielleicht 10 Sek. feststellen zu können. Ferner könnte man von einer unbeweglichen Stelle aus einen photographischen oder mechanischen Eindruck auf das Papier gelangen lassen. Oder man kann, wenn das Papier sorgfältig und gleichmäßig auf die Trommel gespannt ist, den Beginn und den Schluß der Aufzeichnung zeitlich festlegen und nachträglich die Zwischenpunkte eintragen.

Unter derselben Voraussetzung ließe sich endlich gleichzeitig mit der Höhenskale eine Zeitskale vorher photographisch auf das Papier bringen, die einer am Rande der Trommel befindlichen Vergleichsskale gegenübergestellt würde; mittels eines von außen sichtbaren Zeigers würden zu Beginn die Nullpunkte in Übereinstimmung gebracht und zum Schluß die Lage fixiert. So würde eine natürliche Korrektion möglich, die auch angebracht erscheint wegen einer etwaigen Größenänderung des Papieres beim Aufbringen auf die Trommel oder bei seiner späteren chemischen Behandlung. Diese Methode dürfte neben dem Löschen

der Lampe die praktischste sein und ist bei der Ausführung des Apparates zunächst ins Auge gefaßt worden.

3. Stellung der Skale gegen die Verschiebungsrichtung.

Sehr störend beim Gebrauch des Apparates muß endlich noch ein Umstand erscheinen: die starke Abweichung der Bewegungsrichtung des Dosenapparates von der Vertikalen. Man wird die Dosen gegen die Trommel neigen müssen, um die Richtung in Übereinstimmung mit der Skale zu bringen; oder aber, da die Schwerkraft — besonders bei Schwankungen im Ballon — auf die Dosen einen wenn auch sehr geringen Einfluß ausübt, so wäre es ratsamer, die Dosenachse vertikal zu lassen und die Trommel nebst Uhrwerk um den betreffenden Winkel geneigt anzubringen. Ein anderer Weg aber vermeidet dies fast völlig und dürfte deshalb vorzuziehen sein: die schiefe Lage der Bewegungsrichtung läßt sich stark verringern, indem man zwei Dosensysteme in geeigneter Weise verbindet. Hat man diese — jedes um seine Längsachse — richtig gegeneinander verdreht und fest miteinander verbunden, so wird eine unbedeutende Neigung gegen die Trommel die richtige Lage ergeben (vgl. S. 51 f.).

Es bleibt noch übrig, darauf hinzuweisen, daß beim Photographieren der Skale auf das Papier und ebenso beim Aufbringen des so vorbereiteten Papieres auf die Trommel eine feste Richtung sehr genau eingehalten werden muß, damit die Skale in die richtige Lage zur aufzunehmenden Druckkurve kommt. Die Papiere sollen mit kurz vor dem Gebrauch fertig kopierter Skale geliefert werden und müssen dann mit ihrem einen Rande längs einer an der Trommel befindlichen vorspringenden Kante anliegend angebracht werden.

V. Schluss.

1. Anwendungsmöglichkeiten des Apparates.

Im Anschluß an alle bisher mitgeteilten Versuche und Ausführungsformen möge hier ein Überblick folgen über die Anwendungsmöglichkeiten des nachwirkungsfreien Barometers und ergänzend eine kurze Beschreibung der diesen Anwendungen am besten entsprechenden Form.

Barometer dienen entweder als Standinstrumente zur möglichst richtigen Angabe der feineren Luftdruckschwankungen an einem gegebenen Orte, oder sie werden von einem Punkt zu anderen ihrer Höhenlage nach wechselnden Punkten bewegt und sollen dann größere Luftdruckänderungen anzeigen als Maß für die zurückgelegten Höhenunterschiede. Im ersten Falle muß von einem guten Instrument eine Genauigkeit von $^1/_5$ mm Hg verlangt werden über einen Wirkungsbereich von 8 bis 10 cm Hg, da der Luftdruck an einem Orte größeren Schwankungen nicht unterworfen sein wird und eine mit den Angaben des Apparates nicht übereinstimmende Lage des Luftdruckbereiches für jeden Ort durch eine Verschiebung des Angabenbereiches am Barometer selbst beseitigt werden kann. Im Falle des Höhenmessers jedoch dürfte eine Genauigkeit von 1 mm Hg ausreichen — entsprechend einer Höhenänderung von 11 m am Meeresspiegel oder 20 m in 5000 m Höhe; als Bereich aber muß ein Intervall von nahe 60 cm Hg gefordert werden, weil der Apparat für Ballonfahrten bis mindestens 10 km Höhe anwendbar sein soll und der mittlere Luftdruck in 5000 m etwa 39 cm, in 10000 m Höhe aber nur noch etwa 20 cm Hg beträgt, also einen Unterschied gegen 76 cm um 37 bezw. 56 cm aufweist. In beiden bezeichneten Anwendungen wird also eine Genauigkeit von 0,2 % des Gesamtbereiches zu verlangen sein; das gäbe für eine angenommene Ablesungsgenauigkeit bis

	$^1/_5$	$^1/_8$	$^1/_{10}$ mm
einen auf 60 cm Hg zu überstreichenden Bereich von	10	6,25	5 cm auf der Skale.

Nun gaben die zuletzt benutzten vier Dosen zusammen eine Verschiebung von 0,698 mm auf 60 cm Hg Druckdifferenz; also wäre eine Übertragung mit 143- oder 115- oder 71facher Vergrößerung mindestens zu fordern, entsprechend jenen angenommenen Ablesungsgenauigkeiten. Die Durchbiegung der Metalldose eines gewöhnlichen Aneroids hat die Größenordnung von 2 bis 3 mm auf 60 cm Hg. Das Aneroid hat als „Barometer" ein oder zwei Dosen und eine bis 500fache Übertragung mittels mehrerer Hebel und eines Kettchens; als „Barograph" sind meist 8 Dosen aneinandergesetzt mit einer einfachen Hebelübertragung von rund 30facher Vergrößerung. Bis zu so hohen Werten wie der vorige kann aber bei Quarzdosen aus mehreren Gründen nicht gegangen werden. Als Hebel würde erstens auch nur Quarz in Betracht kommen, der für einen Einzelhebel — und mehrere dürfen wegen der Reibung nicht genommen werden — ein zu großes Gewicht haben würde; und ferner wäre jedes genaue Einspielen des Zeigers unmöglich ohne irgend eine Führung; diese aber würde durch die auftretende Reibung den Wert des Apparates illusorisch machen (vgl. S. 30 f.). Rechnet man mit der Möglichkeit, allenfalls noch eine 20fache Übertragung einigermaßen zuverlässig herstellen zu können, so müßte die Zahl der Dosen (bisher vier) mindestens verfünffacht oder für das Standinstrument mit dem sechsmal so kleinen Spielraum und stark verfeinerter Empfindlichkeit vielleicht gar verdreißigfacht werden! Eine Dose aber kostete unter den vorliegenden Verhältnissen gegen 25 Mk. Doch wird sich dieser Preis mit der Zahl der hergestellten Dosen natürlich verringern. Daraus ergibt sich, daß zum mindesten für Standinstrumente nur eine optische Methode denkbar ist und auch nur unter Anwendung einer größeren Dosenzahl, da Vergrößerungen von gegen 100 schon unpraktisch werden. Bei einem Instrument für Luftschiffe und Flugzeuge aber kommen deshalb nur die optischen Methoden in Betracht, weil es ständig Bewegungen und Erschütterungen ausgesetzt ist, die ein feiner Zeiger nicht vertragen würde. Hier wird man aber auch die subjektive mikroskopische Methode nicht gern wählen, weil sie stets einige Zeit erfordert, während der der Flieger seine Höhenlage meist erheblich geändert haben wird. Daher ist hier nur die photographische Methode am Platze, wie sie am Schluß zusammenfassend dargestellt ist. Vorher sei noch eine Bemerkung angefügt über die brauchbarste Größe der Quarzdosen.

In Hinsicht auf die Festigkeit und die Durchbiegung lassen sich die Dosen annähernd nach den Formeln für am Rande befestigte runde Platten betrachten (vgl. Föppl, Festigkeitslehre, 1914, Seite 261 und 262 und diese Schrift, Seite 18). Für die Spannung, welche den Grad der Festigkeit durch die zulässige Beanspruchung bestimmt, die sogen. reduzierte Spannung, gilt:

$$\sigma_{red} = \frac{3\,(m^2 - 1)}{4\,m^2} \cdot \frac{r^2}{h^2} \cdot p\,,$$

und für die Stärke der Durchbiegung:

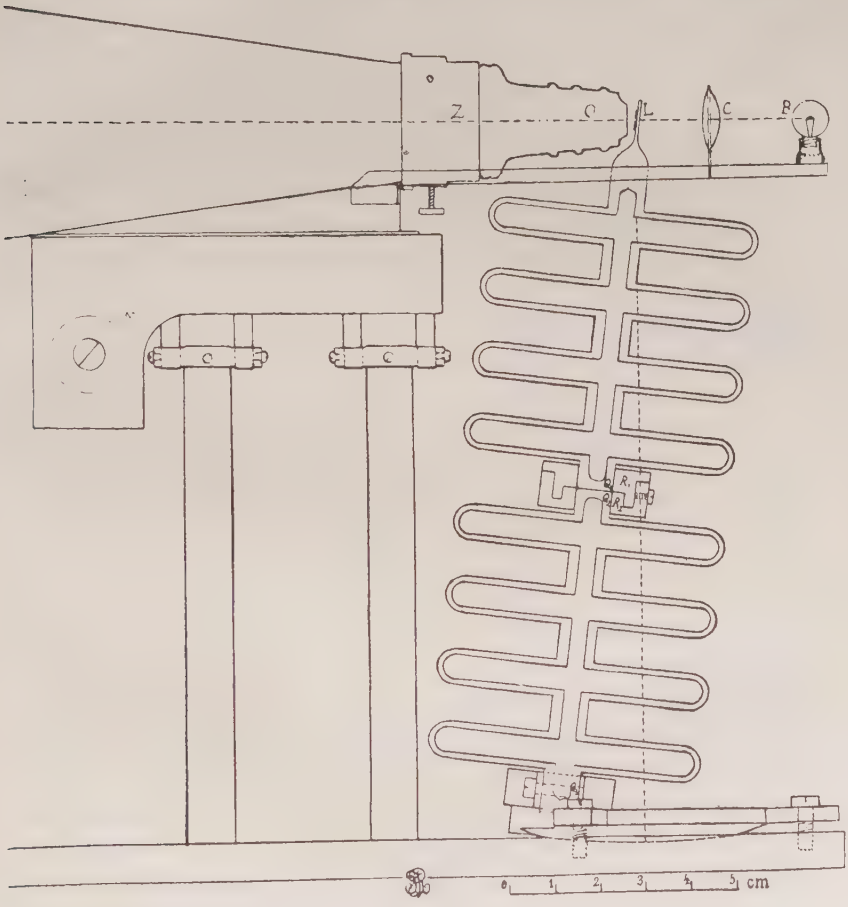
$$f = \frac{3\,(m^2 - 1)}{16\,m^2 \cdot E} \cdot \frac{r^4}{h^3} \cdot p\,,$$

wo E der Elastizitätsmodul, $\frac{1}{m}$ die Poissonsche Konstante (Querkontraktion durch Längsdehnung), p die Kraft auf die Flächeneinheit, r der Radius und h die halbe Dicke der Platte ist. Für gleiche Festigkeit muß also z. B. eine Dose von doppeltem Radius die doppelte Wandstärke erhalten. Damit wäre ihre Durchbiegung wegen des Radius auf das 16 fache gestiegen und wegen der Wandstärke zugleich um das 8 fache gesunken, hätte sich also tatsächlich verdoppelt, d. h. die Durchbiegbarkeit für gleiche Festigkeit ändert sich proportional dem Radius. Mit zunehmendem Radius der Dosenscheibe wird also die Empfindlichkeit steigen. Doch wird man allzu große Durchmesser wegen der Schwierigkeit der Herstellung vermeiden. Als recht praktisch erwies sich nun (vgl. S. 25) ein Radius von 3 cm und dazu eine Wandstärke von $1^1/_4$ bis $1^1/_2$ mm; diese war nicht überall gleich und konnte naturgemäß nirgends genau festgestellt werden. Dosen, deren Wandstärke stellenweise nur 0,9 mm betrug, hielten Atmosphärendruck nur wenige Stunden aus. Ein genauer Wert für die Festigkeitsgrenze läßt sich wegen der Inhomogenität der Quarzglasdosen nicht angeben; daher diene jene Angabe aus dem praktischen Versuch als Anhalt.

2. Beschreibung des Apparates.

Der endgiltige Apparat ist, wie erwähnt, noch nicht gebaut worden. Seine Ausführung ist aber kurz in folgender Weise geplant (siehe Figur 7). Auf einer Grundplatte aus Messing (um die Temperaturdehnung der Objektivteile zu kompensieren) sind

die Dosen, das Objektiv mit Beleuchtungsapparat und die Trommel mit Uhrwerk montiert. Die acht luftleeren Dosen bilden zwei gegeneinander verstellbare Gruppen, verbunden durch zwei auf die Quarzstutzen Q_1 und Q_2 mit Wasserglas aufgekittete Nickelstahlringe (Nickelstahl mit 36 % Ni; dessen Temperaturkoeffizient beträgt nach Guillaume, Comptes rendus **124**, S. 176 (1897), rund 0,000 000 92) R_1 und R_2, die ineinander drehbar und mit



Figur 7.

drei Schrauben (der Achsenschnitt zeigt nur eine) festklemmbar sind. Da die beiden Gruppen so gegeneinander gedreht sein sollen, daß zwar auch die Gesamtneigung der Bewegungsgeraden des oberen Endes möglichst wenig von der Vertikalen abweicht, aber vor allem die Richtungen für die Druck- und für die mini-

male Temperaturbewegung möglichst zusammenfallen, so wird — um die Bewegungsrichtung vertikal zu erhalten — mit einer geringen Neigung der Dosenachse gegen die Vertikale zu rechnen sein. Diese Neigung ist hier als groß, zu etwa 7^0, angenommen und die entsprechende Befestigung aus der Figur ersichtlich. Der untere Quarzstutzen Q_3 steckt wieder in einem Ring, welcher durch einen seitlichen Ansatz in einer Kugelschale um einen oben beim Loche L zu denkenden Mittelpunkt drehbar angeordnet und mit drei Schrauben festklemmbar ist. Daneben steht auf einer gegen Temperaturdehnung kompensierten Verbindung eine Mikrometerführung M, die ein Aluminiumrohr mit Zentriervorrichtung Z und Objektiv „C“ (O in der Figur) daran trägt. Durch eine Gabel wird von hier aus auch die beleuchtende Lampe B und eine das Licht nach dem Loche hin sammelnde Linse C gehalten. Das Loch (L) ist in ein Stanniolblättchen gestochen, welches auf einem am oberen Dosenfortsatz angeschmolzenen Quarzplättchen mit Wasserglas festgeklebt ist. Das Licht wird von dort durch das Rohr in ein Aluminiumgehäuse geleitet mit der über ein leichtes Uhrwerk gesetzten Aluminiumtrommel darin. Diese trägt bei Benutzung das lichtempfindliche Papier in Verbindung mit der oben (S. 46 f.) beschriebenen Zeitmarkeneinrichtung. Ist der Abstand vom photographischen Papier bis zum Objekt (L) 29 cm, so erhält man für die oben angenommene Bewegung der Dosen (für acht Dosen 1,4 mm auf 60 cm Hg Druckdifferenz) eine etwa 43 fache Vergrößerung des Objektives „C“, d. h. die Wiedergabe eines Druck-Zentimeters in Größe eines Millimeters auf dem Papier. Die Abmessungen des Apparates wären dann annähernd: Länge 49, Breite 16 und Höhe 22 cm. Das Gewicht wird etwa 6 kg betragen, da das Uhrwerk mit Trommel 1 kg, die Mikrometerverschiebung mit Tubus, Zentrierung und Objektiv ebensoviel und die Metallverbindungen vielleicht 4 kg wiegen. Dazu kommt ein Akkumulator, der z. B. von der „Varta“ Akkumulatoren-Gesellschaft m. b. H. Berlin für 13 Amp.-Std. — also bei 0,5 Amp. Entladestrom für über 24 Stunden ausreichend — im Gewicht von nur 1,6 kg geliefert werden kann. Der Preis des Apparates wird allerdings ziemlich hoch, da allein die Dosen gegen 200 Mk. und das Objektiv 30 Mk. kosten. Dafür ist aber sofortige richtige Wiedergabe der Luftdruckschwankungen damit erreichbar.

Für die Benutzung als Standinstrument wäre am praktischsten die Ersetzung der photographischen Einrichtung durch eine

Skale, wie sie oben (Seite 43) erwähnt ist. Wegen der hier verwendeten geringeren Verschiebungen wird man die Skale weiter fortrücken und wird damit die Genauigkeit bedeutend steigern können. Auch die direkte mikroskopische Ablesung wäre hier ganz angebracht. Dazu empfiehlt sich Zeiss' orthoskopisches Okular 7 (Vergr. 20 fach, Preis 25 Mk.) mit dem Mikrometer 5 mm/100 (Preis 7.50 Mk.), wie es bei den oben behandelten Versuchen beschrieben ist (s. S. 33). Dort sind auch die Sehfeldbereiche für die verschiedenen Objektive angegeben. Dabei ist sogar das Objektiv D (Vergr. mit Okular „7" zusammen etwa 1100 fach) anwendbar, falls man nicht mehr als 4 Dosen von der Seite 50 angegebenen Größe nimmt. Man erhält dann einen Bereich von etwa 7 cm Hg, was im allgemeinen ausreichend ist, besonders wenn man für unerwartet große Ausschläge den Tubus durch eine Mikrometerverschiebung nachrücken kann.

Die Skalenablesung ergäbe annähernd, wenn einem Fünftel Druck-mm Hg — soviel muß noch sicher ablesbar sein — $\frac{1}{10}$ Skalen-mm entsprechen soll, bei 8 Dosen und

Objektiv	B	C	D
einen Abstand der Skale vom Objekt von cm:	247	148	82

Bei der mikroskopischen Ablesung (Tubus 160 mm) würde einem Fünftel Druck-mm Hg folgender Teil eines Skalenteiles — der im Okular „7" bei Mikrometer 5 mm/100 als etwa 1 mm erscheint — bei 8 Dosen entsprechen:

für Objektiv	B	C	D
Teil eines Skalen-„mm":	0,134	0,229	0,412

Lebenslauf.

Ich, Friedrich Berens von Rautenfeld, bin zu Riga am 22. September 1889 als ältester Sohn eines Arztes geboren, bin russischer Staatsangehöriger (Balte) und lutherischer Konfession. Bis zum Sommer 1905 erhielt ich Privatunterricht nach dem Programm der (deutschen) St. Petri-Kirchenschule in Petersburg, an welcher ich das Examen in die 6. Klasse (die 3. von oben) machte, um in das (russische) Rigaer Stadtgymnasium einzutreten. Dieses wurde bald darauf während der lettischen Revolution geschlossen, und wir siedelten nach Dresden über, wo ich Ostern 1906 in die Obersekunda des (humanistischen) Vitzthumschen Gymnasiums eintrat. Bei der Zerlegung der Oberprima in eine sprachlich-historische und eine mathematisch-naturwissenschaftliche Abteilung entschied ich mich für letztere und machte Ostern 1909 das Abiturium. Nach anfänglichem Schwanken zwischen der Dresdener Technischen Hochschule und der Leipziger Universität begann ich darauf das Studium der Naturwissenschaften in Leipzig, wo ich bis zu dessen Abschluß geblieben bin. Anfangs lebte ich in der Familie meines verehrten Landsmannes Professor v. Oettingen, durch den ich viele Anregungen empfing. Neben mathematischen und physikalischen Vorlesungen hörte ich namentlich Chemie, Anatomie, Zoologie, Botanik, Mineralogie, Philosophie, Psychologie und machte praktische Übungen in Physik, Chemie, Mineralogie und einen mikroskopischen Ferienkurs mit. 1912 begann ich im physikalischen Institut bei Professor Wiener die praktischen Arbeiten, aus welchen diese Doktorschrift hervorgegangen ist.